



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS DE FILTROS PARA LA
DETECCIÓN DE FALLOS EN
RODAMIENTOS INDUSTRIALES
A PARTIR DE SU SEÑAL DE
VIBRACIÓN**

TITULACIÓN

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL:
MECÁNICA**

Autor

Rafael Somonte Martín

Tutores

Cristina Castejón Sisamón

Alberto Junior Ordóñez Rangel

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para dar las gracias a todas las personas que han contribuido en mi formación:

A todos los profesores, que han estado dispuestos a ayudarme durante todos estos años en la universidad.

A mis tutores, Cristina Castejón y Alberto Junior Ordoñez, por guiarme y aconsejarme en la realización de este proyecto fin de carrera.

A mi familia, en especial a mi hermana Almudena, que siempre me ha apoyado y animado a seguir adelante.

A mis amigos, por haber estado conmigo en todo momento.

A mis compañeros de clase, porque ha sido genial aprender con ellos.

MUCHAS GRACIAS A TODOS.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Antecedentes.....	8
1.2. Objetivos.....	10
1.3. Organización de documento	11
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. Transformada de Fourier	12
2.1.1. Transformada Rápida de Fourier	12
2.1.2. Transformada Corta de Fourier	13
2.2. Transformada Wavelet.....	14
2.2.1. Transformada Wavelet Continua.....	15
2.2.2. Transformada Wavelet Discreta	17
2.2.3. Transformada Wavelet Estacionaria.....	18
2.3. Transformada de Hilbert-Huang.....	19
2.4. Rodamientos.....	22
3. DESARROLLO.....	26
3.1. Descripción del proyecto	26
3.2. Sistema experimental de toma de señales	27
3.2.1. Aplicaciones	28
3.2.2. Componentes	29
3.3. Nomenclatura utilizada para las señales	34
3.4. Señales adquiridas.....	35
4. PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES	39
4.1. Procesamiento mediante la Transformada Rápida de Fourier	39
4.2. Filtrado mediante la Transformada Wavelet Estacionaria	44
4.3. Filtrado mediante la Transformada de Hilbert-Huang.....	51
4.4. Análisis comparativo de los métodos desarrollados.....	54
4.5. Relación de las frecuencias obtenidas respecto a las teóricas para cada condición y velocidad.....	57
4.6. Márgenes de error entre las frecuencias teóricas y las experimentales	71
4.7. Diferencias entre los rodamientos con defecto y el normal.....	72



5. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	76
5.1. Conclusiones.....	76
5.2. Futuros desarrollos	77
6. BIBLIOGRAFÍA	78
7. ANEXOS	80
Anexo I: Condiciones de seguridad de la Máquina Simuladora de Fallo (MSF) Spectra Quest.....	80
Anexo II: Instrucciones de montaje de la MSF Spectra Quest.....	82
Anexo III: Instrucciones de montaje de los rodamientos MB Manufacturing ER10K	84
Anexo IV: Rodamiento MB Manufacturing ER10K.....	86
Anexo V: Motor de Tres Fases de CA Marathon Electric de 1/2 & 1/3 CV	87
Anexo VI: Panel de control Delta Serie VFD	88
Anexo VII: Acelerómetro MMF KD37V	89
Anexo VIII: Amplificador MMF M32	90
Anexo IX: Tarjeta de adquisición de datos Keithley KUSB-3100.....	91



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Ecuaciones de las frecuencias características del rodamiento.....	24
Tabla 3-1. Parámetros del ensayo experimental.....	26
Tabla 3-2. Características necesarias de los rodamientos.....	33
Tabla 3-3. Frecuencias de defecto del rodamiento.....	33
Tabla 4-1. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud correspondientes a los espectros de frecuencias de la TRF de la señal del rodamiento normal.....	40
Tabla 4-2. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud correspondientes a los espectros de frecuencias de FB.....	41
Tabla 4-3. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud de los espectros de frecuencias de FI.....	43
Tabla 4-4. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud de los espectros de frecuencias de FE.....	44
Tabla 4-5. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud correspondientes a los espectros de frecuencias de la TRF de la señal del rodamiento normal filtrada mediante la TWE.....	47
Tabla 4-6. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud correspondientes a los espectros de frecuencia de WB.....	48
Tabla 4-7. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud de los espectros de frecuencia de WI.....	49
Tabla 4-8. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud de los espectros de frecuencias de WE.....	50
Tabla 4-9. Análisis de frecuencias de FN101 y WN101.....	58
Tabla 4-10. Análisis de frecuencias de HN101.....	59
Tabla 4-11. Análisis de frecuencias de FN201 y WN201.....	59
Tabla 4-12. Análisis de frecuencias de HN201.....	60
Tabla 4-13. Análisis de frecuencias de HN301.....	60
Tabla 4-14. Análisis de frecuencias de FB101 y WB101.....	61
Tabla 4-15. Análisis de frecuencias de HB101.....	62
Tabla 4-16. Análisis de frecuencias de WB201.....	62
Tabla 4-17. Análisis de frecuencias de HB201.....	63
Tabla 4-18. Análisis de frecuencias de WB301.....	63
Tabla 4-19. Análisis de frecuencias de HB301.....	64
Tabla 4-20. Análisis de frecuencias de WI101.....	64
Tabla 4-21. Análisis de frecuencias de HI101.....	65
Tabla 4-22. Análisis de frecuencias de WI201.....	65
Tabla 4-23. Análisis de frecuencias de HI201.....	66
Tabla 4-24. Análisis de frecuencias de WI301.....	66
Tabla 4-25. Análisis de frecuencias de HI301.....	67
Tabla 4-26. Análisis de frecuencias de WE101.....	68
Tabla 4-27. Análisis de frecuencias de HE101.....	68



Tabla 4-28. Análisis de frecuencias de WE201	69
Tabla 4-29. Análisis de frecuencias de HE201	69
Tabla 4-30. Análisis de frecuencias de WE301	70
Tabla 4-31. Análisis de frecuencias de HE301	71
Tabla 4-32. Error entre las frecuencias teóricas y las experimentales de defecto mediante la TWE	71
Tabla 4-33. Error entre las frecuencias teóricas y las experimentales de defecto mediante la THH	72



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Deterioro en rodamiento.....	9
Figura 1-2. Detalle del efecto del golpeteo en rodamiento.....	9
Figura 1-3. Esquema-resumen sobre el desarrollo del proyecto.....	10
Figura 2-1. Procesamiento de una señal vibratoria, TRF.....	13
Figura 2-2. Familias de Wavelet más utilizadas.....	15
Figura 2-3. Esquema de la aplicación de la Transformada Wavelet.....	16
Figura 2-4. Procesamiento de una señal vibratoria, TWC.....	17
Figura 2-5. Transformada Wavelet Estacionaria con dos niveles de descomposición	19
Figura 2-6. Shifting process.....	20
Figura 2-7. Descomposición Modal Empírica de una señal.....	21
Figura 2-8. Elementos que componen un rodamiento.....	23
Figura 2-9. Picadura en aro exterior y espectro asociado.....	25
Figura 2-10. Picadura en aro interior y espectro asociado.....	25
Figura 2-11. Picadura en rodillo y espectro asociado.....	25
Figura 3-1. Máquina para la Simulación de Fallos Spectra Quest.....	27
Figura 3-2. Motor eléctrico.....	29
Figura 3-3. Panel de control.....	30
Figura 3-4. Acelerómetro.....	30
Figura 3-5. Amplificador.....	31
Figura 3-6. Tarjeta de adquisición de datos.....	31
Figura 3-7. Programa de adquisición de datos.....	32
Figura 3-8. Rodamiento.....	33
Figura 3-9. Señales en función del tiempo del rodamiento sin defecto a 10 Hz, 50000 muestras (FN10).....	36
Figura 3-10. Señales temporales del rodamiento con defecto en bola a 20 Hz, 50000 muestras (FB20).....	36
Figura 3-11. Señales temporales del rodamiento con defecto en pista interior a 20 Hz, 50000 muestras (FI20).....	37
Figura 3-12. Señales temporales FE30.....	37
Figura 4-1. Procesamiento de la señal del rodamiento sin defecto mediante la Transformada Rápida de Fourier, 50000 muestras (FN).....	40
Figura 4-2. FB.....	41
Figura 4-3. FI.....	42
Figura 4-4. FE.....	43
Figura 4-5. Menú principal de la herramienta de Wavelet: herramientas especializadas 1-D: filtrado TWE 1-D.....	44
Figura 4-6. Archivo: cargar señal.....	45
Figura 4-7. Descomponer señal.....	45
Figura 4-8. Filtrar.....	46



Figura 4-9. Señal filtrada.....	46
Figura 4-10. TRF de la señal del rodamiento sin defecto filtrada mediante la Transformada Wavelet Estacionaria, 50000 muestras (WN).....	47
Figura 4-11. WB.....	48
Figura 4-12. WI.....	49
Figura 4-13. WE.....	50
Figura 4-14. Transformada Hilbert-Huang de las cinco primeras FMI del rodamiento sin defecto a 10 Hz, 50000 muestras (HN101).....	51
Figura 4-15. FMI desde la 6 hasta la 10 de HN101.....	52
Figura 4-16. FMI desde la 11 hasta la 15 de HN101.....	52
Figura 4-17. Dos últimas FMI y residuos de HN101.....	53
Figura 4-18. Transformada Hilbert-Huang de las cinco primeras FMI del rodamiento sin defecto a 20 Hz, 50000 muestras (HN201).....	53
Figura 4-19. Primera FMI de HN301.....	54
Figura 4-20. Rodamiento sin defecto a 10 Hz, 50000 muestras (N101).....	55
Figura 4-21. B201.....	55
Figura 4-22. I201.....	56
Figura 4-23. E301.....	56
Figura 4-24. Espectros de frecuencias del rodamiento sin defecto a 10 Hz, 50000 muestras (N101).....	58
Figura 4-25. Espectros de frecuencias de N201.....	59
Figura 4-26. Espectros de frecuencia de N301.....	60
Figura 4-27. Espectros de frecuencia de B101.....	61
Figura 4-28. Espectros de frecuencias de B201.....	62
Figura 4-29. Espectros de frecuencias de B301.....	63
Figura 4-30. Espectros de frecuencias de I101.....	64
Figura 4-31. Espectros de frecuencias de I201.....	65
Figura 4-32. Espectros de frecuencias de I301.....	66
Figura 4-33. Espectros de frecuencias de E101.....	67
Figura 4-34. Espectros de frecuencias de E201.....	68
Figura 4-35. Espectros de frecuencias de E301.....	70
Figura 4-36. Símil entre rodamiento sin defecto [(a), (c) y (e)] y rodamiento con defecto en bola [(b), (d) y (e)] a 10 Hz, 50000 muestras.....	73
Figura 4-37. Símil entre rodamiento sin defecto [(a), (c) y (e)] y rodamiento con defecto en pista interior [(b), (d) y (e)] a 20 Hz, 50000 muestras.....	74
Figura 4-38. Símil entre las señales temporales del rodamiento sin defecto y el rodamiento con defecto en pista exterior.....	75



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El mantenimiento de los componentes de máquinas ha sido uno de los campos más importantes de la ingeniería mecánica a lo largo de su historia, la correcta evaluación del estado dinámico de dichos componentes es el elemento clave para un correcto plan de mantenimiento y en este campo es en el que se encuadra este proyecto.

Desde un punto de vista cronológico, en los inicios de las actividades de mantenimiento industrial se comienza a practicar el mantenimiento correctivo, subsanando las averías en el momento en que se producen. Seguidamente llegaría el mantenimiento preventivo, con sus inspecciones o intervenciones planificadas. Y más recientemente se ha comenzado a desarrollar el mantenimiento predictivo, en el que se realizan actuaciones en función del estado de los equipos. Sin embargo, esta progresión aún no ha terminado, de manera que se está asistiendo a una mutación hacia el mantenimiento pro activo, caracterizado por la evolución simultánea de la metodología y de los medios utilizados, primando en todo ello una buena gestión [1].

El mantenimiento predictivo no sustituye a otros métodos de mantenimiento tradicionales (correctivo, preventivo). Es un valioso complemento para mejorar la comprensión de un programa integrado de mantenimiento. No tiene sólo efectos en la disminución de costes, tiene también algo mucho más importante como es el aumento de la seguridad de las personas e instalaciones. Dado que este tipo de control permite diagnosticar más temprano la evolución de la avería, se disminuyen las averías catastróficas, las cuales podrían provocar daños en el personal de producción o en los demás sistemas de la instalación y consigue reducir significativamente el número de averías inesperadas mejorando la planificación y programación de intervenciones de mantenimiento.

Este tipo de mantenimiento también mejora la calidad en la recepción de nuevos equipos o que fuesen reparados por terceros. Las técnicas usadas permiten diagnosticar el verdadero estado o condición en la que la máquina se encuentra. De este modo se evitan costos resultantes de todo un proceso, normalmente tedioso y difícil, para la corrección de problemas. Debido a que la mayor parte de los equipos de la industria son mecánicos y rotativos [2], la medición de vibraciones es normalmente la técnica clave en la mayor parte de los programas de mantenimiento [3].

La importancia de la utilización de este tipo de técnicas, deriva del hecho de existir relaciones causa-efecto entre las vibraciones medidas y las averías de las máquinas rotativas. Según estudios efectuados, cerca del 90% de las averías de las máquinas rotativas fueron precedidas de un aumento significativo de sus niveles de vibración [4]. Cada máquina posee en sus condiciones normales de funcionamiento una curva



vibratoria característica, cuando una avería comienza a desarrollarse el comportamiento dinámico de la máquina se altera y consecuentemente también se altera su curva vibratoria. Puede demostrarse que existen curvas vibratorias típicas para cada tipo de avería.

Verdaderamente, las grandes ventajas del mantenimiento predictivo son: detectan un gran número de averías, lo hacen en su fase inicial, a menudo no es necesario parar la máquina, permiten diagnosticar la causa de la avería, etc.

En la práctica es muy difícil evitar la vibración. Ésta existe debido a efectos dinámicos resultantes de desequilibrios, desalineamientos, holguras, desgastes (figura 1-1), etc. Muchas veces, pequeñas fuerzas desequilibradas pueden excitar frecuencias naturales de componentes, dando origen a vibraciones de gran amplitud, muchas veces destructivas, en el estado que es conocido por resonancia [4].



Figura 1-1. Deterioro en rodamiento.

Dentro de esta línea, en este proyecto fin de carrera se elabora una aplicación del sistema basado en conocimiento para análisis de vibraciones en mantenimiento predictivo, la inspección del estado de rodamientos para su mantenimiento (figura 1-2).

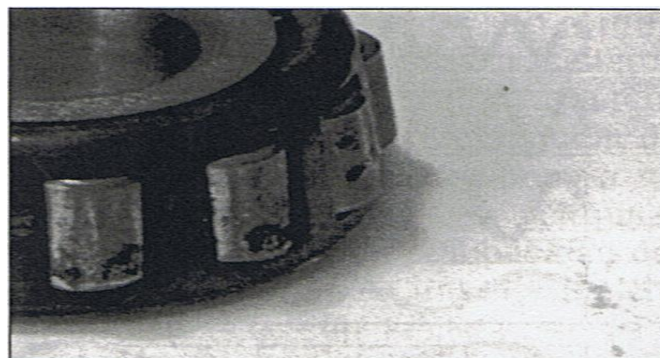


Figura 1-2. Detalle de efecto del golpeo en rodamiento.

Existen diferentes técnicas para diagnosticar las vibraciones [5], pero quizás la más conocida es la Transformada de Fourier (TF), en la que en lugar de obtener la vibración en función del tiempo realiza un análisis de la misma en función de la frecuencia.

1.2. Objetivos

Este proyecto fin de carrera se sitúa dentro del área del análisis predictivo, destaca su interés en automatizar la detección y clasificación de fallos en rodamientos de bola según cuatro tipos de defectos localizados: rodamiento con defecto en pista interna, rodamiento con defecto en pista externa, rodamiento con defecto en bola y rodamiento sin defecto o también llamado normal.

El objetivo principal de este proyecto fin de carrera es el de analizar diferentes filtros que se aplicarán a señales de vibración con el objetivo de detectar fallos en rodamientos industriales. La aplicación y comparación de los diferentes sistemas de filtrado se ha realizado sobre datos reales adquiridos de un banco de ensayos de laboratorio.

Las señales de vibración procedentes de los distintos tipos de rodamientos son filtradas inicialmente por diferentes filtros, puesto que posteriormente se procesarán con el fin de obtener el mejor método de localización de los defectos.

Un filtro es un sistema que, dependiendo de las variaciones de las señales de entrada en el tiempo y amplitud, realiza un procesamiento matemático sobre dicha señal obteniéndose en la salida la eliminación de partes no deseadas de la misma, tales como ruido o sólo permitir el paso de un cierto rango de frecuencias.

El primer filtrado corresponde con las herramientas unidimensionales especializadas de la Transformada Wavelet (TW), más concretamente se utilizará el llamado filtrado unidimensional de la Transformada Wavelet Estacionaria (TWE). Y el segundo filtrado utiliza como técnica la Transformada de Hilbert-Huang (THH).

El procesamiento se realiza con la Transformada de Fourier, exactamente la Transformada Rápida de Fourier (TRF).

Todos los sistemas de análisis mencionados, tanto la TRF como la TWE 1-D y la THH, serán tratados a través del programa de cálculo Matlab[®] 2007 que presenta algoritmos ya preprogramados de estas herramientas.

Un esquema-resumen sobre el desarrollo del proyecto puede verse en la figura 1-3.

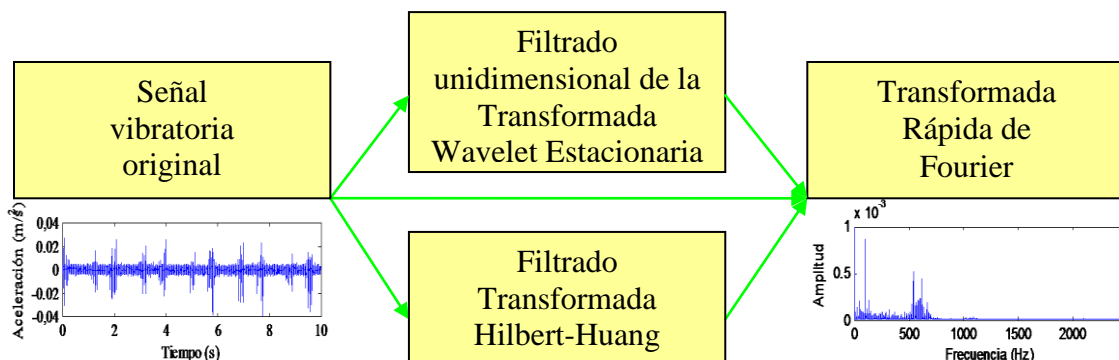


Figura 1-3. Esquema-resumen sobre el desarrollo del proyecto.



1.3. Organización de documento

La estructura del presente proyecto se divide en siete capítulos:

CAPÍTULO 1

En la introducción se desarrolla la evolución de los diferentes tipos de mantenimiento, centrándose en el predictivo en base al análisis de vibraciones; los objetivos y la presente organización también corresponden a este capítulo.

CAPÍTULO 2

Se presentará toda la base teórica del proyecto. Primeramente, en el capítulo se expondrá la Transformada Rápida de Fourier, que es la herramienta empleada para el análisis y clasificación de las señales. Posteriormente, se desarrollará la Transformada Wavelet centrándose en el filtrado unidimensional de la Transformada Wavelet Estacionaria y también se detallará la Transformada Hilbert-Huang. Finalizando el capítulo se mostrará teoría sobre rodamientos.

CAPÍTULO 3

Se explicará el desarrollo del proyecto, incluyendo su descripción, el sistema experimental de toma de señales (componentes y aplicaciones), la nomenclatura usada para éstas y las señales adquiridas.

CAPÍTULO 4

Se exponen los diferentes filtrados y el procesamiento de las señales experimentales, utilizando la Transformada Rápida de Fourier como herramienta de análisis de señales. Además, comprende el análisis comparativo de los métodos desarrollados, relación de las frecuencias obtenidas respecto a las teóricas, diferencias entre los rodamientos con defecto y el normal, etc.

CAPÍTULO 5

Consta de la conclusión de cuál es el óptimo filtrado para detectar y clasificar los defectos en los rodamientos de bola y también de futuros desarrollos que se pueden realizar a partir de este proyecto fin de carrera.

CAPÍTULO 6

Es la bibliografía empleada para el documento.

CAPÍTULO 7

Se adjuntan unos anexos, entre los que figuran las normas de seguridad de la máquina de ensayo; las instrucciones de montaje de la Máquina Simuladora de Fallo y de los rodamientos; características del rodamiento y del motor; especificaciones del panel de control y de la tarjeta de adquisición de datos; propiedades, características y datos técnicos del acelerómetro; aplicación, propiedades y datos técnicos del amplificador; etc.

2. MARCO TEÓRICO

Algunas señales, al representarlas mediante la TRF en un espectro de frecuencias, ocultan información debido al ruido, armónicos e interferencias, que perturban la señal. Por esta razón se han utilizado la TWE y la THH, las cuales demodulan la señal eliminando gran cantidad de ruido. A continuación, se explican los marcos teóricos de las mismas.

2.1. Transformada de Fourier

A principios del siglo XIX, Joseph Fourier formuló su teoría de análisis de frecuencia, ahora conocida como Síntesis de Fourier [6], y considerada la base del análisis moderno de señales. Fourier introdujo el concepto de que una función periódica $f(x)$ puede ser representada mediante una expresión analítica simple, al superponer funciones base ortonormales (seno y coseno), como muestra la ecuación 2.1, que logra trasladar una señal del dominio temporal a un dominio en frecuencia. El análisis de la señal en frecuencia, para un período P , viene dado por los coeficientes n de estas bases ortonormales, los cuales representan la contribución de los componentes seno y coseno de la señal en todo el rango de frecuencias.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left(a_n \cos\left(\frac{n\pi x}{P}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi x}{P}\right) \right) \right\} \quad (2.1)$$

Donde los coeficientes de Fourier se calculan a través de las ecuaciones 2.2 y 2.3, como se presenta a continuación:

$$a_n = \frac{1}{P} \int_{x_0}^{x_0+2P} f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{P}\right) dx \quad (2.2)$$

$$b_n = \frac{1}{P} \int_{x_0}^{x_0+2P} f(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{P}\right) dx \quad (2.3)$$

2.1.1. Transformada Rápida de Fourier

En el año 1965, se gesta el desarrollo de una implementación computacional para la Transformada de Fourier [7], denominada Transformada Rápida de Fourier, que

permitió la primera aplicación del análisis espectral en tiempo real [8]. La TRF mejoró la eficiencia computacional de la Transformada de Fourier de una señal discreta y se ha utilizado tradicionalmente en el diagnóstico de defectos en rodamientos. Estas frecuencias son halladas con la aplicación de la TRF.

A pesar de su fácil implementación práctica, existen muchas desventajas asociadas a la técnica de la TRF. La primera de ellas es que no proporciona ninguna información acerca del dominio del tiempo de la señal, omitiendo detalles valiosos del fenómeno físico en estudio. Esto genera un gran problema a la hora de evaluar señales de naturaleza no estacionaria, donde es particularmente beneficioso obtener una correlación entre el dominio de la frecuencia y del tiempo.

Adicionalmente, los impulsos vibratorios que genera un defecto incipiente en un rodamiento son difícilmente detectables con este esquema, al menos hasta que el defecto logre afectar en alto grado al sistema, debido a que la TRF es incapaz de representar funciones no periódicas de manera precisa, como las señales que poseen impulsos transitorios.

En la figura 2-1 se ilustra la TRF de una señal.

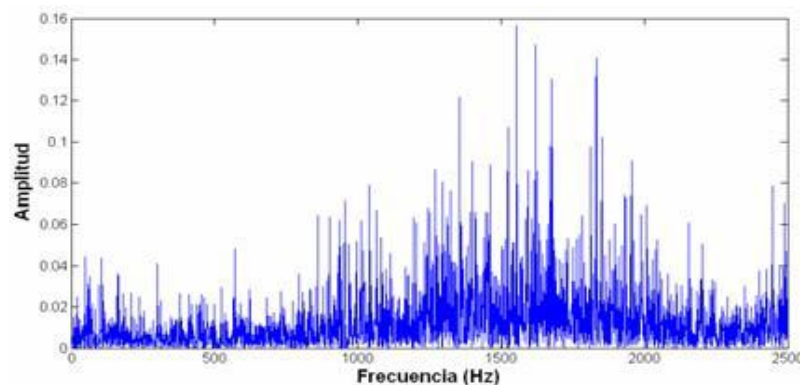


Figura 2-1. Procesamiento de una señal vibratoria, TRF.

2.1.2. Transformada Corta de Fourier

Para resolver las limitaciones de la TRF, en los últimos años se han desarrollado otras técnicas suplementarias para el análisis de señales no estacionarias, entre ellas, la Transformada Corta de Fourier (TCF) [9]. Este método realiza la transformación de una señal unidimensional, a una función de dos dimensiones de tiempo y frecuencia, a través de la multiplicación de la señal a analizar por una función ventana. Sin embargo, este método de análisis tiempo-frecuencia presenta diversos problemas.

La principal desventaja de la TCF es que posee una resolución limitada para el dominio del tiempo y de la frecuencia, ya que se utiliza el mismo ancho de ventana durante el análisis de la señal entera. Esto origina que la resolución sea constante, y significa que,

si se desea obtener un resultado con una buena resolución en frecuencia utilizando ventanas amplias (para el análisis de señales con componentes de baja frecuencia), la técnica no sería capaz de conseguir una buena resolución en el tiempo (ventanas estrechas), lo cual es importante para análisis de señales con componentes de alta frecuencia. Por este motivo, la TCF es adecuada para el análisis de señales cuasiestacionarias (estacionarias a la escala de la ventana), que no representan precisamente el comportamiento de señales reales. Otra desventaja es que no existen bases ortogonales para la TCF, de modo que resulta complicado encontrar un algoritmo rápido y efectivo para calcularla.

2.2. Transformada Wavelet

El Análisis Wavelet es el siguiente paso lógico en la evolución del procesamiento de señales. Ofrece una técnica adecuada tanto para análisis de señales estacionarias, como no-estacionarias. Esto es debido a que proporciona un análisis de resolución múltiple (en el tiempo y frecuencia), a diferentes escalas y resoluciones, siendo especialmente útil para la diagnosis de defectos.

En el año 1909 se hizo la primera mención de la palabra Wavelet, en la tesis del científico húngaro Alfred Haar, y cuyos resultados más relevantes publicó en [10]. Desafortunadamente, la Wavelet de Haar no es diferenciable, lo cual limita su aplicabilidad. Casi dos décadas más tarde, muchos grupos de trabajo independientes investigaron la representación de funciones por métodos que varían en escala, a través del desarrollo del concepto de funciones base, de esta forma surgió el enfoque moderno de las Wavelets.

Como se explicó en el apartado 2.1, la Transformada de Fourier traslada una señal del dominio temporal a un dominio en frecuencia, utilizando senos y cosenos como funciones base. En cambio, la Transformada Wavelet traslada una señal del dominio espacial al dominio en escala mediante el uso de un grupo infinito de funciones base con energía finita, llamadas Wavelets. El término “Wavelet” es un diminutivo de la palabra “wave” (onda, en el idioma inglés), por lo que significaría “onda pequeña”. Esto se refiere principalmente a que la misma es de naturaleza oscilatoria, y de longitud finita (soporte compacto).

Las Wavelets son familias de funciones que se encuentran definidas en el espacio y se emplean como funciones de análisis, examinando la señal de interés en el plano tiempo-frecuencia para obtener sus características periódicas y no periódicas. Una familia de Wavelets está definida por la ecuación 2.4:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R} \quad a > 0 \quad (2.4)$$

Cada uno de los componentes de la familia se genera a partir de la Wavelet Madre $\psi(t)$, a través de las variables de escala a , que permite hacer dilataciones y contracciones de la señal, y la traslación b , que se encarga de mover la señal en el tiempo. Las principales familias de Wavelets son Daubechie, Biortogonal, Coiflet, Symlet, Morlet, Sombrero Mexicano y Meyer [11]. Todas ellas tienen una ecuación específica que las representa, y que las hace diferenciarse en su forma, como muestra la figura 2-2. La Wavelet Haar pertenece a la familia Daubechies.

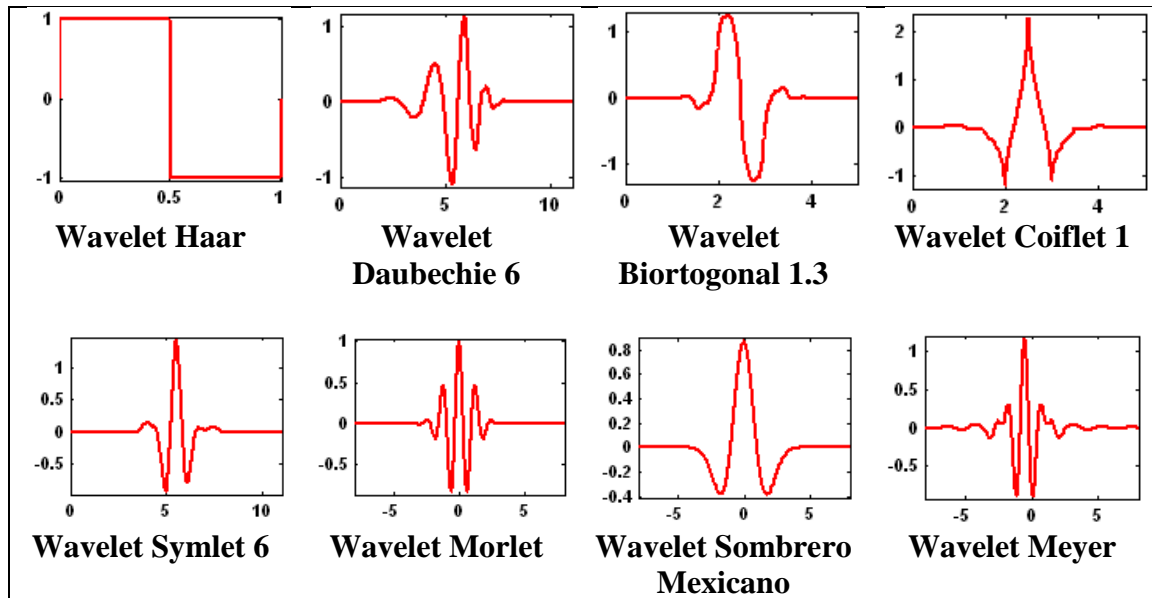


Figura 2-2. Familias de Wavelet más utilizadas.

2.2.1. Transformada Wavelet Continua

A mediados de la década de los setenta y principios de la década de los ochenta, Morlet et al. [12, 13, 14] introducen la TWC en la comunidad geofísica internacional, como una técnica alternativa a la TCF, para superar el problema de resolución causado por el solapamiento de datos. La TWC se realiza de manera similar a la TCF, ya que la señal es multiplicada por una función, en este caso denominada Wavelet, análoga a la función ventana de la TCF, y la transformada se calcula separadamente para distintos segmentos de la señal en el dominio del tiempo. La TWC transformada (TWC_t) se calcula según la ecuación 2.5:

$$TWC_t(a, b; \psi) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.5)$$

En donde $f(t)$ es la señal a la cual se aplica la transformada, $\Psi_{a,b}^*(t)$ es el conjugado complejo de la Función Wavelet $\Psi_{a,b}(t)$ y TWC_t es una función de dos variables, a y b , parámetros de escala y traslación respectivamente, que irán cambiando de valor a lo largo del proceso de análisis, y cuyo fundamento se explica a continuación.

Escala a

La escala en el Análisis Wavelet es análoga a la escala de los mapas geográficos. Las altas escalas corresponden a una visión global no detallada de la señal, y las bajas escalas corresponden a una visión detallada. De igual manera, en términos de frecuencia, las bajas frecuencias (altas escalas) corresponden a una información global que comúnmente abarca toda la señal, mientras que las altas frecuencias (escalas bajas) corresponden a una información detallada de una característica oculta en la señal, que se produce en un tiempo relativamente pequeño. De esta manera, el escalado como operación matemática produce una dilatación o compresión de la señal; los valores altos de escala corresponderán a señales dilatadas y las escalas pequeñas corresponden a señales comprimidas. La relación entre escala y frecuencia es:

$$F_a = \frac{F_c}{a \cdot \Delta} \quad (2.6)$$

Donde:

a es la escala

Δ es la frecuencia de muestreo (Hz)

F_c es la frecuencia central de la Wavelet (Hz)

F_a es la pseudo-frecuencia correspondiente a la escala a (Hz)

Traslación b

El término traslación se relaciona con la localización de la ventana a medida que ésta se desplaza a lo largo de la señal. Obviamente, este término corresponde a la información del tiempo en el dominio transformado.

La traslación se realiza sobre el dominio del tiempo, mientras que el escalado se realiza conforme a la dilatación y compresión de ventanas, obteniendo coeficientes de correlación.

Una representación esquemática del Análisis Wavelet se ilustra en la figura 2-3.

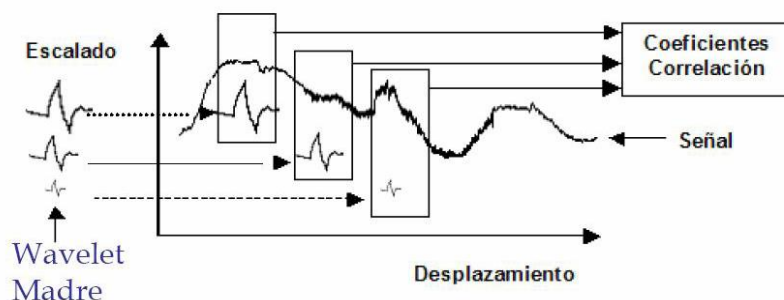


Figura 2-3. Esquema de la aplicación de la Transformada Wavelet.

Para el caso de la TWC, la señal $f(t)$ puede ser reconstruida aplicando la ecuación 2.7, que representa la Transformada Inversa de la Wavelet Continua, bajo ciertos criterios de admisibilidad dados por la ecuación 2.8.

$$f(t) = \frac{1}{K^2} \iint CWT(a, b) \frac{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}{a^2} \cdot da \cdot db \quad (2.7)$$

Donde K es una constante determinada por el tipo de Wavelet que se ha utilizado en la transformación, la cual se conoce como constante de admisibilidad y se define como:

$$K = \sqrt{2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|H(w)|^2}{|w|} dw} < \infty \quad (2.8)$$

Siendo $H(w)$ la Transformada de Fourier de $\psi(t)$.

En la figura 2-4 se ilustra la Transformada Wavelet Continua de una señal.

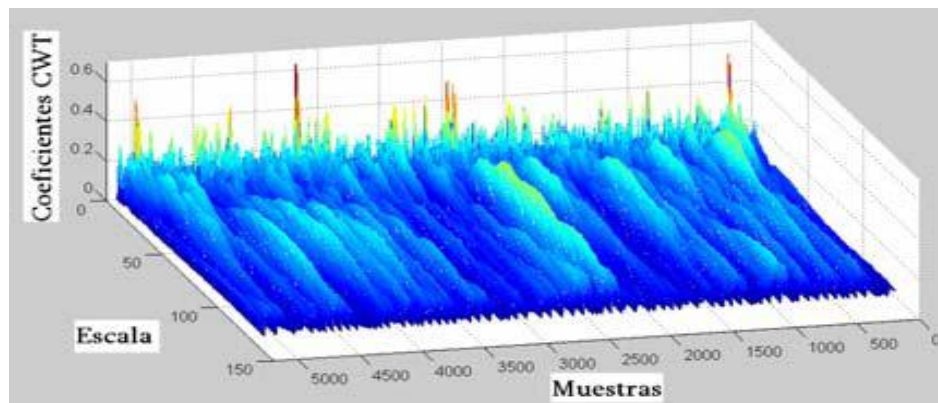


Figura 2-4. Procesamiento de una señal vibratoria, TWC.

Es posible visualizar que la TWC ofrece una gran cantidad de información en tres dimensiones.

2.2.2. Transformada Wavelet Discreta

El cálculo de la TWC constituye un proceso numérico bastante complejo, y resulta evidente que no puede realizarse fácilmente de manera práctica, debido a que implica la resolución de ecuaciones analíticas complejas. Para evitar este cálculo, Croiser et al. [15] dieron los primeros pasos con una técnica distinta, más interesante a nivel práctico, denominada Transformada Wavelet Discreta (TWD).

La TWD se basa en la discretización de los parámetros de escala y de tiempo de la TWC, lo que facilita la implementación práctica del Análisis Wavelet, al mejorar considerablemente el tiempo de procesamiento de datos, sin descuidar la calidad de la información que proporciona.

La Función Wavelet Continua $\Psi_{a,b}(t)$ de la ecuación 2.4, se transforma en la función Wavelet Discreta $\Psi_{j,k}(n)$, como muestra la ecuación 2.9:

$$\psi_{j,k}(n) = a^{-\frac{j}{2}} \cdot \psi(a^{-j}n - kb) \quad (2.9)$$

Los parámetros a y b se definen generalmente según la escala diádica, tal como indica la ecuación 2.10, donde j representa el nivel de descomposición y k es el factor de traslación.

$$a = 2^j; b = k 2^j \quad a > 0; b > 1 \quad (j, k) \in \mathbb{R}^2 \quad (2.10)$$

De esta manera, sea la señal a analizar $f(n)$ una función discreta, la Transformada Wavelet Discreta de esta señal viene dada por la ecuación 2.11:

$$TWD_n(j, k) = a^{-1/2} \int f(n) \psi(a^{-j}n - kb) dn \quad (2.11)$$

Para reconstruir la señal $f(n)$ a partir de los coeficientes de la TWD_n , debe existir la condición de estabilidad planteada por la ecuación 2.12.

$$A \|f(n)\|^2 \leq \frac{2}{A+B} \sum_j \sum_k |DWT_n|^2 \leq B \|f(n)\|^2 \quad A > 0; B < \infty \quad (2.12)$$

Cuanto más cercanos sean los valores de A y B , la reconstrucción de la señal es más precisa. En el caso de $A=B=1$, entonces la familia de Wavelets es ortonormal.

2.2.3. Transformada Wavelet Estacionaria

La Transformada Wavelet Estacionaria (TWE) se puede obtener modificando el esquema básico de la Transformada Wavelet Discreta (TWD). Se aplican los dos filtros para producir a la salida dos secuencias en cada nivel. Debido a que no se hace decimación se obtiene a la salida de cada nivel, secuencias de longitud igual a la señal original. Pero se modifican los filtros en cada nivel agregándole ceros [16].

Para explicar el procedimiento se introduce el operador $\uparrow 2$, este operador alterna una secuencia con ceros; por ejemplo, si $y = \uparrow 2(x)$ entonces $y_{2i} = x_i$ y $y_{2i+1} = 0$. Los filtros g y h para cada nivel de descomposición se calculan en la ecuación 2.13.

$$\begin{aligned} g_{j+1} &= \uparrow 2(g_j) \\ h_{j+1} &= \uparrow 2(h_j) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Donde h_0 y g_0 son los filtros originales utilizados en la TWD. En la figura 2-5 se puede observar el esquema análisis de la TWE.

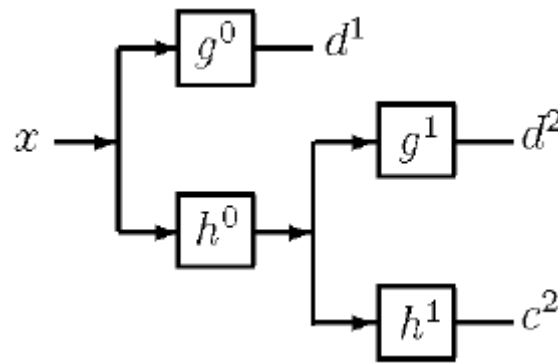


Figura 2-5. Transformada Wavelet Estacionaria con dos niveles de descomposición.

Los coeficientes d de la TWE a diferencia de la TWD tienen una cantidad igual a la longitud de la señal analizada. Esta última característica permite realizar la detección de cambios abruptos sobre los coeficientes de las diferentes escalas.

2.3. Transformada de Hilbert-Huang

La mayoría de las señales reales contienen datos no estacionarios y no lineales, para tratar este tipo de datos se requiere de un método adaptativo y la Transformada de Hilbert-Huang cumple esta condición [17].

Un método adaptativo es aquel en el que la definición de la base es dependiente de los datos y por tanto se realiza a posteriori, esto rompe con los métodos tradicionales de análisis de señales.

En el caso de la Transformada de Hilbert-Huang, al tratarse de un método adaptativo tiene un precio que es la dificultad de encontrar una base teórica firme. Se trata de un método empírico que hasta el momento ha presentado en todos los casos estudiados mejores aproximaciones que los métodos tradicionales para representaciones tiempo-frecuencia-energía.

La Transformada de Hilbert-Huang puede dividirse en dos etapas: Descomposición Modal Empírica y análisis espectral de Hilbert.

DESCOMPOSICIÓN MODAL EMPÍRICA

La Descomposición Modal Empírica se basa en la suposición de que cualquier conjunto de datos puede dividirse en un conjunto de modos de oscilación intrínsecos. Cada modo de vibración, lineal o no, representa una oscilación simple que tiene el mismo número de extremos relativos y puntos de corte con el eje OX. Además la oscilación será simétrica respecto de su media local. Es decir, en un instante de tiempo los datos tienen una gran cantidad de modos de oscilación, cuya suma es el estado de vibración total. Cada uno de los modos de vibración se llama Función Modal Intrínseca (*FMI*) y puede definirse de la siguiente manera [17]:

- ✓ En el conjunto total de datos el número de extremos y ceros debe ser igual.
- ✓ En cualquier punto, el valor medio de la envolvente definida por los máximos relativos y la envolvente definida por los mínimos relativos es cero.

El algoritmo de la Descomposición Modal Empírica es el siguiente:

Se identifican todos los máximos y los mínimos y se traza una *spline* cúbica que pase por todos los máximos y otra que pase por todos los mínimos, la media de ambas *splines* será m_1 .

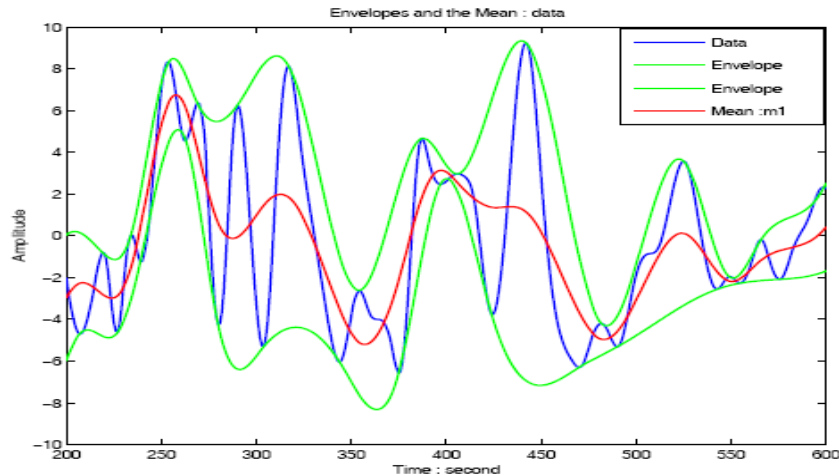


Figura 2-6. Shifting process.

Se resta dicha media al conjunto total de datos obteniendo h_1 :

$$h_1 = x - m_1 \quad (2.14)$$

Se vuelve a repetir este proceso con h_1 , y se obtendrá la media m_2 y un nuevo subconjunto h_2 . Este proceso que se muestra en la figura 2-6, denominado *shifting process*, debe ser repetido tantas veces como sea necesario hasta conseguir una *FMI*.

Surge la necesidad de establecer un criterio de parada, hay dos posibilidades, la primera de ellas es que la diferencia cuadrática, ecuación 2.15, entre dos muestras consecutivas sea menor que un valor prefijado. Huang propone un segundo método, el proceso parará cuando el número de ceros y extremos difiera en no más de 1 consecutivamente durante un número prefijado de veces.

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}(t)^2} \quad (2.15)$$

Una vez se cumple el criterio de parada separamos nuestra *FMI*, se la restamos a los datos iniciales obteniendo un residuo al que volveremos a aplicar el *shifting process*. Seguiremos aplicando la descomposición hasta que se cumpla uno de los dos siguientes criterios, que el valor de los residuos sea muy pequeño o que éstos sean una función sin extremos relativos de la que no se podrán extraer más *FMI*.

El resultado final será similar al ejemplo mostrado en la figura 2-7 [17].

Evidentemente la señal inicial puede recomponerse con tan sólo sumar las *FMI* obtenidas y los residuos finales, dichos residuos suelen despreciarse a la hora de efectuar el análisis posterior.

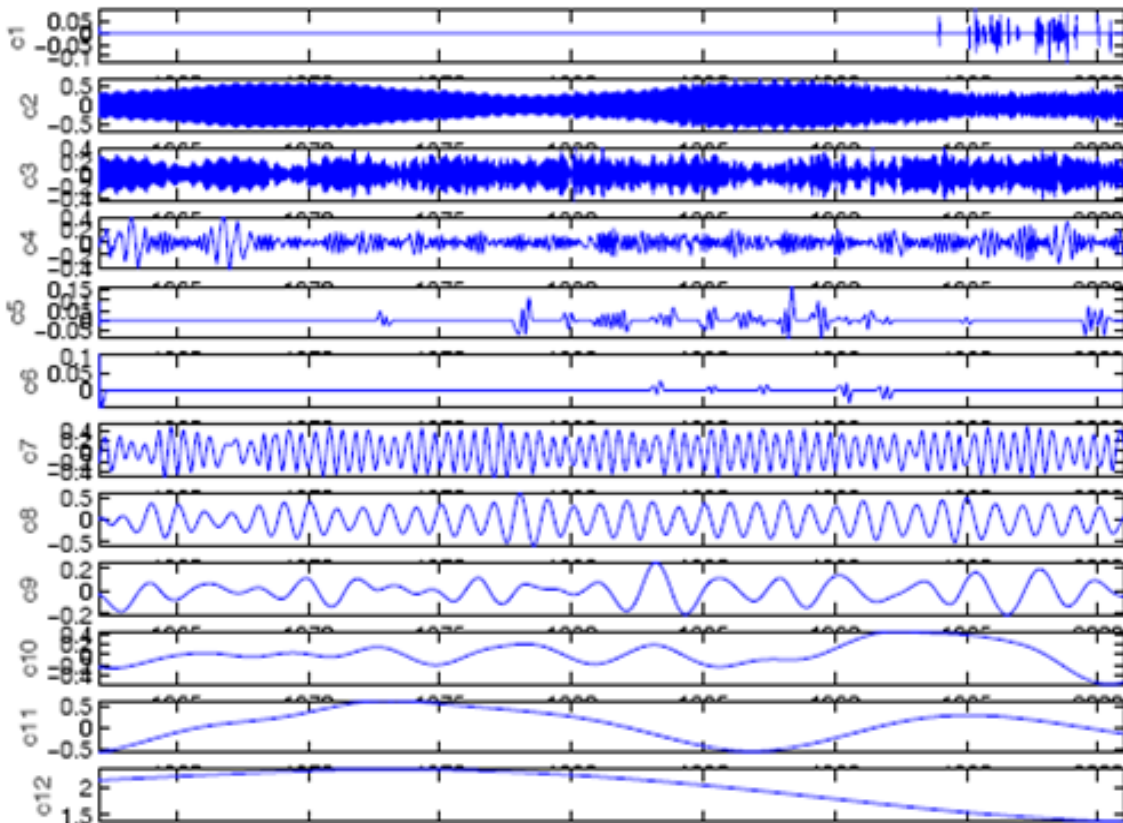


Figura 2-7. Descomposición Modal Empírica de una señal.

ANÁLISIS ESPECTRAL DE HILBERT

Una vez hecha la Descomposición Modal Empírica puede aplicarse la Transformada de Hilbert a cada una de las *FMI* obtenidas. El motivo para realizar la descomposición es poder encontrar las frecuencias instantáneas de la señal, antes de que Huang introdujera la *DME* la utilización de la Transformada de Hilbert se limitaba a señales con el mismo número de extremos y ceros [17].

La transformada de Hilbert se define como:

$$y(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(u)}{t-u} du \quad (2.16)$$

La señal analítica se define como:

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (2.17)$$

Donde:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (2.18)$$

$$\theta(t) = \arctg\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \quad (2.19)$$

Por último podemos hallar la frecuencia instantánea por medio de la ecuación 2.20.

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.20)$$

Con estos datos puede realizarse una gran cantidad de análisis, todos los ensayos indican que la Transformada de Hilbert-Huang es una herramienta muy potente para el análisis tiempo-frecuencia de señales no lineales y no estacionarias. Está basada en una base adaptativa y la frecuencia se define a través de la Transformada de Hilbert.

2.4. Rodamientos

Uno de los elementos más críticos en cualquier máquina rotativa son los cojinetes y rodamientos, pues sobre ellos descansa todo el peso del rotor. Al mismo tiempo soportan todos los esfuerzos dinámicos que se originan como consecuencia de desequilibrios, desalineaciones, excentricidades...



Un fallo no detectado en un rodamiento puede degenerar con cierta rapidez en una avería catastrófica (bloqueo del motor, contactos indeseados entre partes fijas y móviles, etc.).

La gran extensión de las máquinas rotativas en la industria hace que la aplicación de técnicas encaminadas a la vigilancia, control y diagnóstico del estado de rodamientos adquiera suma importancia.

A pesar de ser elementos baratos en comparación con el valor de la máquina, la necesidad de desmontar casi completamente la máquina para su sustitución hace aún más interesantes la aplicación de técnicas predictivas para agotar al máximo posible la vida de los rodamientos (claro está, sin llegar a la zona de riesgo de fallo). La técnica predictiva por excelencia para la detección de fallos en rodamientos es el análisis de vibraciones.

Cualquier rodamiento tiene cuatro partes fundamentales: aro exterior, aro interior, elementos rodantes y jaula (figura 2-8).

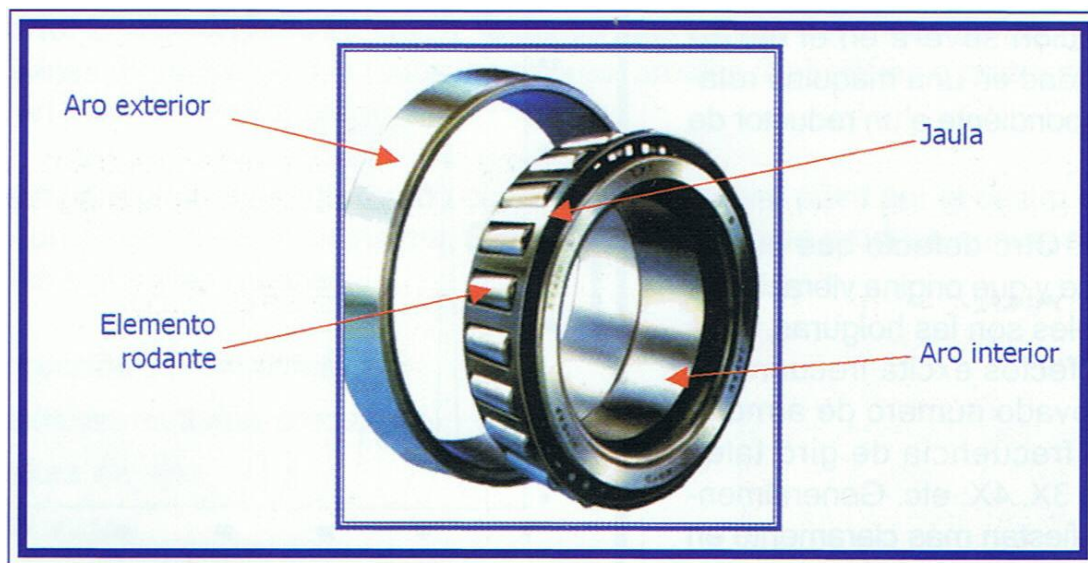


Figura 2-8. Elementos que componen un rodamiento. [18]

Un defecto en cualquiera de estas partes produce una vibración característica fácilmente detectable en un espectro de frecuencia. Estas frecuencias de fallo del rodamiento dependen de dos factores: la velocidad de giro y los parámetros geométricos del rodamiento (diámetros primitivo, exterior e interior, diámetro de los elementos rodantes, número de elementos rodantes y ángulo de contacto entre las pistas y los elementos rodantes), y vienen dadas por unas fórmulas matemáticas (tabla 2-1).

En función de la parte del rodamiento afectada, pueden definirse hasta cuatro frecuencias características:



- *BPFO (Ball Pass Frequency of the Outer race;* frecuencia de paso de bola, anillo exterior)
- *BPFI (Ball Pass Frequency of the Inner race;* frecuencia de paso de bola, anillo interior)
- *BSF (Ball Spin Frequency,* frecuencia de rotación de bola)
- *FTF (Fundamental Train Frequency,* frecuencia fundamental de tren)

Tabla 2-1. Ecuaciones de las frecuencias características del rodamiento.

DEFECTO	EXPRESIÓN
En pista exterior	$BPFO = \frac{N}{2} \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{\phi_r}{\phi_p} \cdot \cos \alpha \right)$
En pista interior	$BPFI = \frac{N}{2} \cdot \omega \cdot \left(1 + \frac{\phi_r}{\phi_p} \cdot \cos \alpha \right)$
En bola o rodillo	$BSF = \frac{\phi_p}{2 \cdot \phi_r} \cdot \omega \cdot \left(1 - \left(\frac{\phi_r}{\phi_p} \cdot \cos \alpha \right)^2 \right)$
En jaula	$FTF = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{\phi_r}{\phi_p} \cdot \cos \alpha \right)$

Siendo:

- N = número de elementos rodantes
 ω = velocidad de giro del eje
 ϕ_r = diámetro de los elementos rodantes
 ϕ_p = diámetro primitivo (diámetro de la circunferencia imaginaria formada por los centros geométricos de los elementos rodantes)
 α = ángulo de contacto

A continuación se muestra un ejemplo de los fallos tipo anteriormente expuestos, detectados en los rodamientos de máquinas rotativas a partir de las técnicas de análisis espectral de vibraciones:

DAÑO EN PISTA EXTERIOR (BPFO) DE RODAMIENTO (figura 2-9)

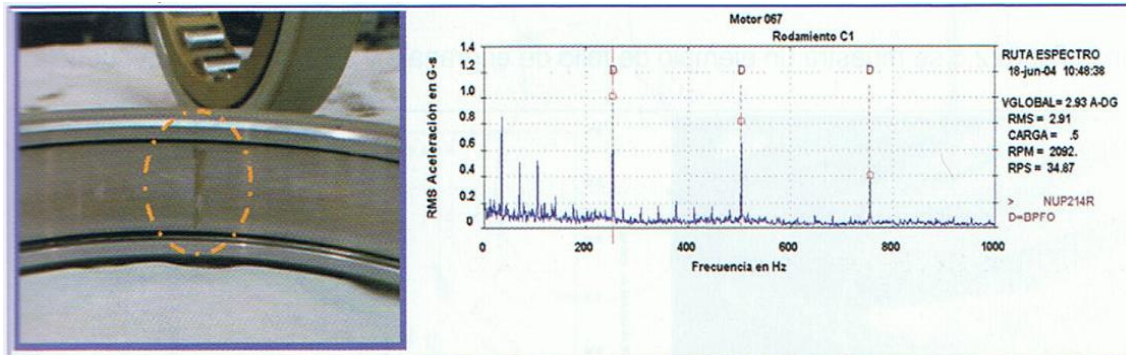


Figura 2-9. Picadura en aro exterior y espectro asociado. [18]

DAÑO EN PISTA INTERIOR (BPFI) DE RODAMIENTO (figura 2-10)

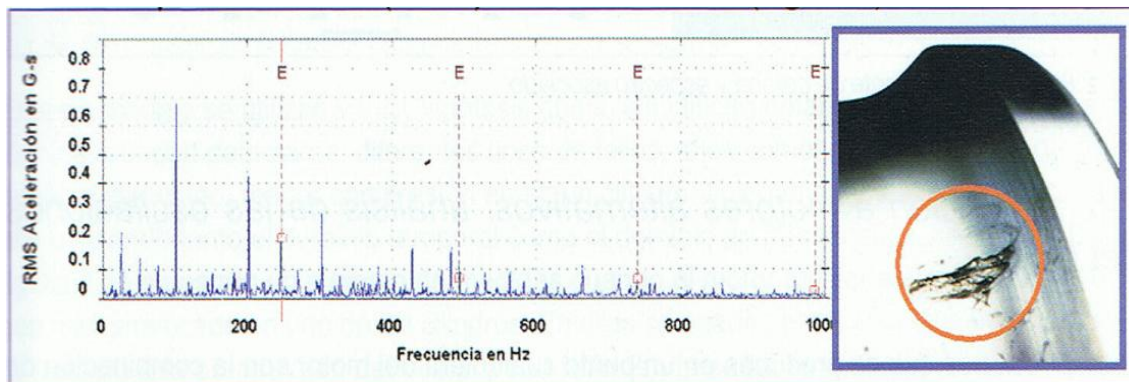


Figura 2-10. Picadura en aro interior y espectro asociado. [18]

DAÑO EN BOLA O RODILLO (BSF) (figura 2-11)

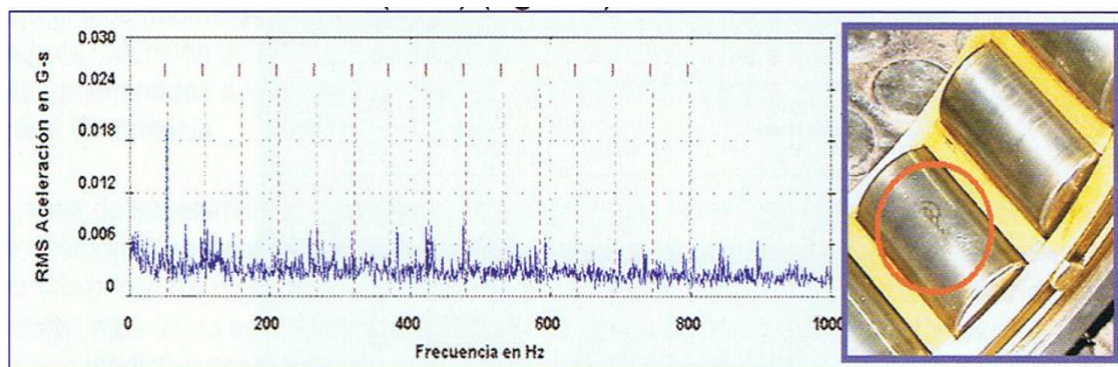


Figura 2-11. Picadura en rodillo y espectro asociado. [18]



3. DESARROLLO

3.1. Descripción del proyecto

Con el fin de detectar y clasificar los defectos en los rodamientos se dispone de un banco de ensayos (apartado 3.2) mediante el cual se adquieren las vibraciones de los mismos gracias a un acelerómetro.

Los rodamientos estudiados, con la marca MB Manufacturing y la serie ER10K, son de cuatro condiciones diferentes: rodamiento normal, con defecto en bola, con defecto en pista externa y en pista interna.

Se ensaya cada clase de rodamiento a tres velocidades de rotación diferentes: 600, 1200 y 1800 rpm.

Además, para cada velocidad se registran cuatro señales en régimen estacionario durante un tiempo de 10 segundos, de las cuales para el estudio sólo se ha utilizado la primera señal para cada tipo de rodamiento y velocidad.

El programa de adquisición de datos usado es el Test Point™ 6.1 y se establecerá en él una frecuencia de muestreo de 5000 Hz, esta frecuencia indica el número de muestras que se toman en un segundo.

Un resumen de los parámetros utilizados en el banco de ensayos para la captación de las señales se muestra en la tabla 3-1:

Tabla 3-1. Parámetros del ensayo experimental.

PARÁMETROS DEL ENSAYO EXPERIMENTAL	
Frecuencia de muestreo	5000 Hz
Tiempo de muestreo	10 segundos
Nº de datos por señal	50000 datos
Clases de rodamientos	Normal o sin defecto, defecto en bola, defecto en pista exterior y en pista interior
Velocidades de ensayo	600, 1200 y 1800 rpm
Nº de señales por velocidad	4 señales

Para tener la información de cada señal en los nombres de las mismas éstas se organizan según una nomenclatura (apartado 3.3), la cual indica el análisis o procesamiento llevado a cabo a la señal, la clase de rodamiento, la velocidad de giro y el número de muestra al que hace referencia.

Al comparar señales deberán tener la misma cantidad de datos, pero no se tomará un número específico para cada señal sino que será en función de la información útil que muestre.

Una vez adquiridas todas las señales, el siguiente paso es estudiarlas, con el fin de obtener el mejor proceso para la detección y clasificación de defectos.

3.2. Sistema experimental de toma de señales

Las señales utilizadas en el presente proyecto fin de carrera han sido tomadas de una bancada de ensayos especialmente diseñada para la adquisición de medidas provenientes de rodamientos en distinto estado.

En este apartado se realiza una descripción de la máquina ensayada, así como sus componentes y utilidades.

La Máquina de Simulación de Fallos (MSF) ha sido diseñada por la empresa Spectra Quest con el objetivo de [19] estudiar comportamientos de maquinaria y elementos en la vida real modelando los posibles fallos y funcionamientos inadecuados de las mismas. Esta máquina, la cual puede observarse en la figura 3-1, permite la posibilidad, entre otras funciones, de realizar experimentos dinámicos, estudiar vibraciones y malos funcionamientos en maquinaria, desarrollándose conocimientos acerca del diagnóstico de problemas en maquinaria, con experimentos controlados.

La investigación de estos fenómenos necesita estudios detallados. Para ello se requieren componentes adicionales a los propios de la máquina de simulación de defectos, los cuales están diseñados para profundizar en los diferentes campos de estudios, gracias a su versatilidad y a su fácil configuración.

En el anexo II se muestran las instrucciones de montaje de la MSF Spectra Quest.

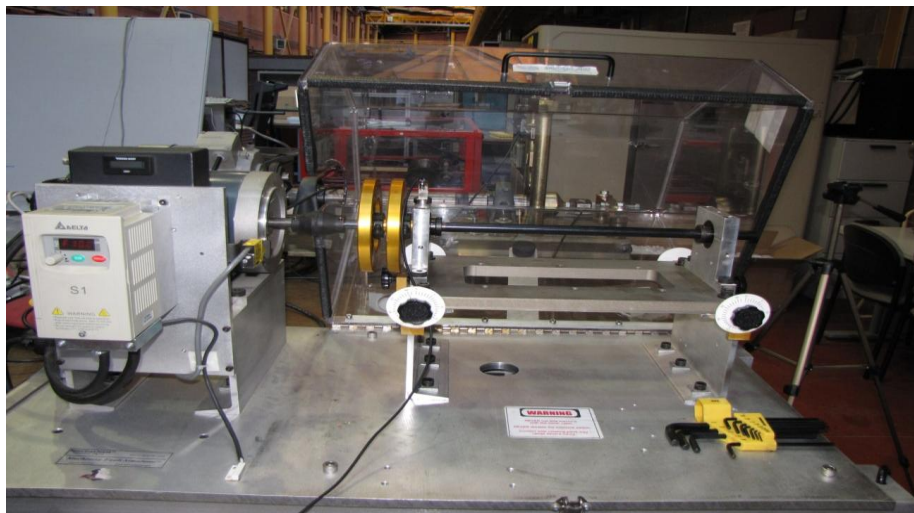


Figura 3-1. Máquina para la Simulación de Fallos Spectra Quest. [19]

Algunas de sus características principales son:

- Posee métodos simples para introducir defectos calibrados y controlados en los elementos a estudiar.



- Permite el estudio del espectro de frecuencias en defectos comunes.
- Desarrolla conocimientos de cara al mantenimiento predictivo.
- Contiene un manual que facilita su entendimiento.
- Es modular, versátil, y fácilmente comprensible.
- Permite el estudio de la resonancia, velocidad variable, caja de cambios y correas.
- Permite determinar el camino de la transición de la vibración y realizar un análisis casual.
- Permite establecer correlaciones entre la vibración, la corriente del motor y el espectro de sonido.
- Permite validar procesos de equilibrio por encima y por debajo del punto crítico.
- Cada componente es diseñado con altas tolerancias para lograr que puedan ser operados sin conflictos de vibración.
- También puede ser utilizada en el estudio de la rigidez dinámica, resonancia y velocidad.

Es importante destacar que la máquina puede ser utilizada en ocasiones para el estudio del comportamiento de algún elemento en presencia de algún defecto inducido, pudiéndose obtener el espectro de frecuencias real. Éste es el objeto del estudio, dado que esta herramienta permite la obtención de señales de vibración para diferentes tipos de rodamientos, que posteriormente se analicen mediante el proceso que se vea más adecuado.

3.2.1. Aplicaciones

Es posible llevar a cabo diferentes tipos de estudios gracias a los equipamientos para aplicaciones específicas. Cada uno de estos *kits* es diseñado para que encaje en el simulador.

La siguiente lista indicará algunos de los muchos caminos mediante los que el simulador puede ayudar a mejorar el conocimiento acerca del diagnóstico en maquinaria y los análisis de vibraciones.

- Estudios de equilibrio.
- Estudios del alineamiento de ejes.
- Evaluación del sistema de alineamiento.
- Estudios de las sujeciones.
- Efectos de la carga y la presencia de defectos en rodamientos.
- Evaluación de rotor inclinado.
- Evaluación de rotor excéntrico.
- Estudios de resonancia.
- Evaluación de correas.
- Estudio del rozamiento.
- Estudio de los fallos en las cajas de cambio.
- Estudios de mecanismos de sujeción.

- Técnicas para procesamiento de la señal.
- Efectos de la variación de la velocidad y de la carga.
- Análisis de la corriente del motor.
- Dinámica de rotación.
- Optimización de montajes de sensores.
- Estudios de vibraciones.
- Adecuación del banco de pruebas para los estudios y demostraciones de la dinámica de rotación.

3.2.2. Componentes

El sistema experimental consta, básicamente, de las siguientes partes:

- Motor eléctrico.
- Panel de control.
- Acelerómetro.
- Amplificador.
- Tarjeta de adquisición de datos.
- Ordenador personal.
- Rodamientos.

A continuación, se mencionan los puntos anteriormente comentados.

MOTOR ELÉCTRICO (figura 3-2)

Es la máquina que hace girar gracias a un acoplamiento el eje que está soportado por dos rodamientos, uno de los cuales es el elemento de estudio (el más cercano al motor).



Figura 3-2. Motor eléctrico.

El motor eléctrico es de la marca Marathon Electric, trabaja con corriente alterna, dispone de tres fases y puede funcionar a una potencia de 1/2 ó 1/3 CV. Sus características se encuentran en el anexo V.

PANEL DE CONTROL (figura 3-3)

Su misión es mostrar la velocidad de rotación del motor eléctrico en Hz y poder modificarla como se precise con el variador de frecuencia. Además, para asegurarse de la velocidad existe un tacómetro que mide la velocidad en rpm.



Figura 3-3. Panel de control.

El panel de control es de la marca Delta, serie VFD y sus especificaciones se pueden ver en el anexo VI.

ACELERÓMETRO (figura 3-4)

Es un dispositivo para medir aceleración, vibración. El acelerómetro consta de un pequeño imán para adherirlo al rodamiento y en su interior se halla un material piezoeléctrico, estos tipos de materiales poseen la característica de que al deformarlos proporcionan una pequeña corriente eléctrica y viceversa. Con ello al moverse el rodamiento y mediante las fuerzas inerciales del acelerómetro el material se deformará y se obtendrá una pequeña diferencia de potencial; se transmitirá al amplificador mediante cables de oro, ya que sus propiedades de conductividad son muy buenas y son imprescindibles debido a la debilidad de la señal obtenida en el acelerómetro.

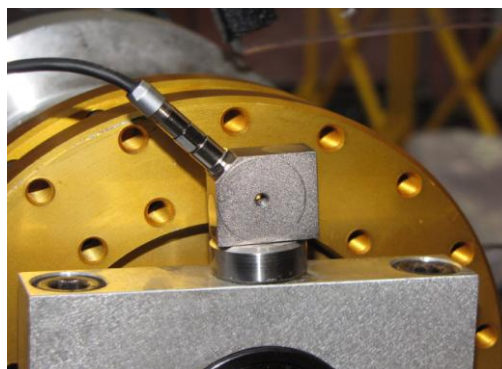


Figura 3-4. Acelerómetro.



Es un acelerómetro de la marca MMF, modelo KD 37V. Sus propiedades, características y datos técnicos están en el anexo VII.

AMPLIFICADOR (figura 3-5)

Su función es amplificar la señal que le llega desde el acelerómetro. Como ya se sabe el acelerómetro crea una pequeña corriente eléctrica, pero es tan pequeña y de tan poca intensidad que sería muy complicado estudiarla. El amplificador, como su propio nombre indica, amplificará la señal llevándola a unos rangos óptimos para su manipulación.



Figura 3-5. Amplificador.

El amplificador es también de la marca MMF, modelo M32 y durante el ensayo se fijará una ganancia (del inglés, *gain*) 10. En el anexo VIII se encuentran su aplicación, propiedades y datos técnicos.

TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (figura 3-6)

Está conectada desde el amplificador y es el paso intermedio entre éste y el ordenador. Se encarga de la adquisición de los datos que proporciona el amplificador para posteriormente enviarlos al ordenador, transformando las señales analógicas en señales digitales. Consta de varios canales para poder adquirir varias señales a la vez, aunque en este ensayo sólo se necesitará uno.



Figura 3-6. Tarjeta de adquisición de datos.



La tarjeta de adquisición de datos es de la marca Keithley, modelo KUSB-3100. Sus características y especificaciones se hallan en el anexo IX.

ORDENADOR PERSONAL

El ordenador recoge los datos directamente de la tarjeta de adquisición de datos. En él se encuentra instalado el software Test Point, que permite controlar la tarjeta digitalizadora y registrar los valores de las aceleraciones en ficheros de formato ASCII. Para la adquisición se ha definido la frecuencia de muestreo y el número de muestras. Se trabajará a 5000 Hz y se adquieren datos durante un total de 10 segundos, por lo tanto, se obtendrá un total de 50000 datos. El programa dará el valor eficaz medio y cuando este valor no varíe y por tanto el ensayo sea estacionario se procederá a la captura de muestras.

Programa de adquisición de datos (figura 3-7). Se trata de un módulo programado con Test Point, basado en programación gráfica en lugar de órdenes escritas; es decir, que la forma de programar consiste en ir seleccionando iconos, cada uno con una función equivalente a las órdenes de los lenguajes tradicionales. El módulo de adquisición de datos es bastante sencillo de utilizar, únicamente se tendrá que seleccionar la frecuencia de muestreo en el recuadro *rate* (Hz) y el número de muestras a tomar en el recuadro *# points*. El botón *Acquire & Graph* grabará la señal que esté entrando en ese momento al ordenador y la mostrará en el recuadro *Acquired Data*. Para guardar la señal a un fichero se utilizará el botón *Save data to disk*. El otro botón que aparece, *Frequency Spectrum*, calcula y muestra la Transformada de Fourier de la señal adquirida.

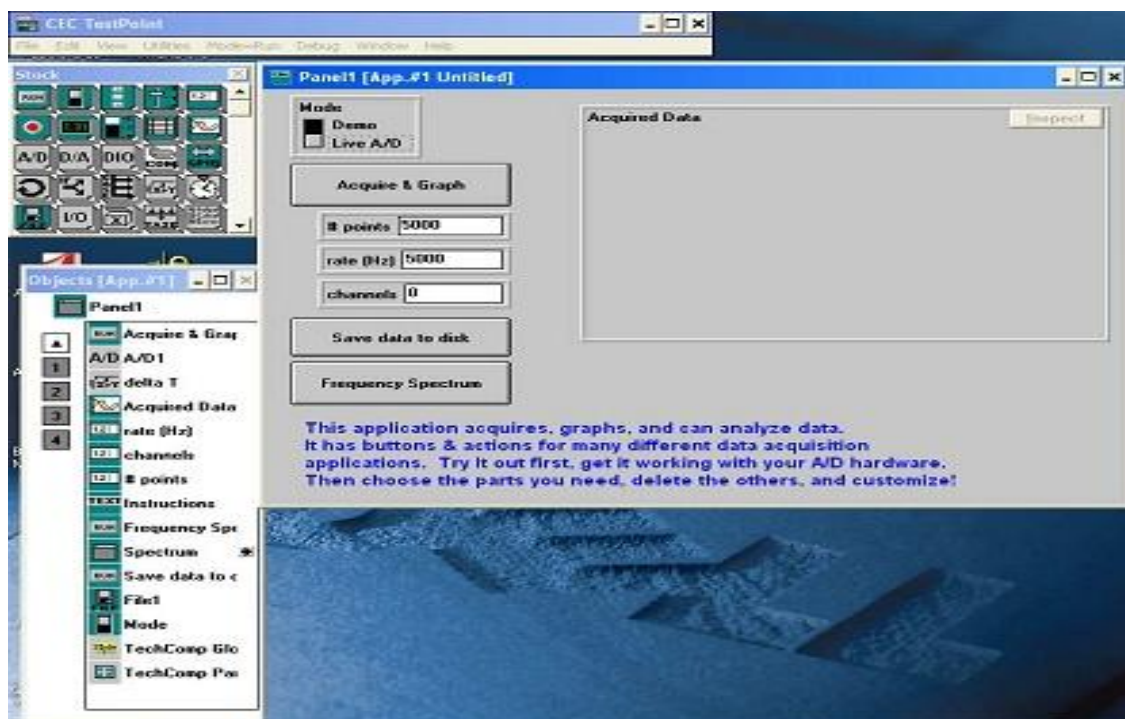


Figura 3-7. Programa de adquisición de datos.

RODAMIENTOS

Los rodamientos utilizados son la serie ER10K de la marca MB Manufacturing, las características principales de dicho rodamiento se pueden encontrar en el catálogo de dicha compañía [20], pero en la tabla 3-1 se indican las características necesarias para llevar a cabo este proyecto.

Las características de los rodamientos se muestran en el anexo IV de este documento.

Tabla 3-2. Características necesarias de los rodamientos.

Diámetro interior [mm]	15.875
Diámetro exterior [mm]	46.99
Diámetro medio (ϕ_p) [mm]	33.49
Número de bolas (N)	8
Diámetro de las bolas (ϕ_r) [mm]	7.94
Ángulo de contacto (α) [°]	0

Con estas características y las fórmulas de la tabla 2-1 se calculan todas las frecuencias de defecto para cada una de las frecuencias de giro a partir de la tabla 3-2.

Tabla 3-3. Frecuencias de defecto del rodamiento.

FRECUENCIA DE GIRO [rpm]	BPFO [Hz]	BPFI [Hz]	BSF [Hz]	FTF [Hz]
600	30.519403	49.480597	19.9106433	3.81
1200	61.038806	98.961194	39.8212865	7.63
1800	91.558209	148.441791	59.7319298	11.44

Se dispondrá de un rodamiento en perfecto estado y tres en estado defectuoso. Se trabaja con tres tipos de rodamientos defectuosos para la realización de los ensayos: defecto en una de las bolas, defecto en la pista interna y defecto en la pista externa.

El rodamiento tendrá su anillo exterior fijo y el anillo interior se mueve solidario al eje de la máquina de ensayo. En la figura 3-8 se muestra el alzado y planta de uno de los rodamientos.



Figura 3-8. Rodamiento: (a) vista en alzado, (b) en planta.

3.3. Nomenclatura utilizada para las señales

Con el fin de resumir la información de los rodamientos y de nombrarlos de forma representativa se utilizó la nomenclatura que a continuación se explica. Los nombres de las señales guardadas se componen de las siguientes partes VXYZ:

- V: representa el tipo de filtrado al que ha sido sometida la señal vibratoria antes de ser procesada. Las señales según contengan una de las siguientes letras, harán referencia al tipo de filtro:
 - ❖ F = señal sin filtrar, procesada directamente con la Transformada Rápida de Fourier
 - ❖ W = señal filtrada con la Transformada Wavelet unidimensional Estacionaria y posteriormente procesada con la Transformada Rápida de Fourier
 - ❖ H = señal filtrada con la Transformada Hilbert-Huang y procesada con la Transformada Rápida de Fourier
- X: indica el rodamiento al que pertenece la señal. Los rodamientos según contengan una de las siguientes letras, harán referencia al tipo de defecto:
 - ❖ N = rodamiento normal o sin defecto
 - ❖ B = rodamiento con defecto localizado en bola
 - ❖ E = rodamiento con defecto localizado en pista externa
 - ❖ I = rodamiento con defecto localizado en pista interna
- Y: muestra la velocidad de giro del banco de ensayos para la cual se obtuvo la señal. Existen tres velocidades diferentes y según la que sea, se identifica de la siguiente forma:

- ❖ 10 = 10 Hz

$$10 \text{ Hz} \equiv 10 \text{ rps} = 10 \frac{\text{rev}}{\text{seg}} \cdot \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 600 \text{ rpm}$$

- ❖ 20 = 20 Hz

$$20 \text{ Hz} \equiv 20 \text{ rps} = 20 \frac{\text{rev}}{\text{seg}} \cdot \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 1200 \text{ rpm}$$



$$\diamond 30 = 30 \text{ Hz}$$

$$30 \text{ Hz} \equiv 30 \text{ rps} = 30 \frac{\text{rev}}{\text{seg}} \cdot \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 1800 \text{ rpm}$$

➤ Z: indica el número de la señal muestreada. Para cada rodamiento y cada velocidad de giro se obtuvieron cuatro señales.

❖ 1 = primera señal muestreada

❖ 2 = segunda señal muestreada

❖ 3 = tercera señal muestreada

❖ 4 = cuarta y última señal muestreada

3.4. Señales adquiridas

Con el equipo de ensayos presentado se han tomado medidas de aceleraciones en cuatro rodamientos que se corresponden con cuatro condiciones de funcionamiento del mismo: normal, defecto en bola, defecto en pista interna y pista externa.

Se ensaya cada clase rodamiento a tres velocidades de rotación diferentes: 600, 1200 y 1800 rpm. El motivo de realizar el ensayo a distintas velocidades es para observar cómo afecta la velocidad en las aceleraciones producidas por los rodamientos, no se consideran velocidades superiores debido a que la máquina funcionaría a valores no recomendados para su correcto funcionamiento (anexo I).

Además, para cada velocidad se registran cuatro señales en régimen estacionario durante un tiempo de 10 segundos, de las cuales para el estudio sólo se ha utilizado la primera señal para cada tipo de rodamiento y velocidad.

En definitiva, se han tomado doce señales por rodamiento o dieciséis señales por velocidad y cuarenta y ocho en total.

A continuación se presentan las señales adquiridas para cada condición del rodamiento:

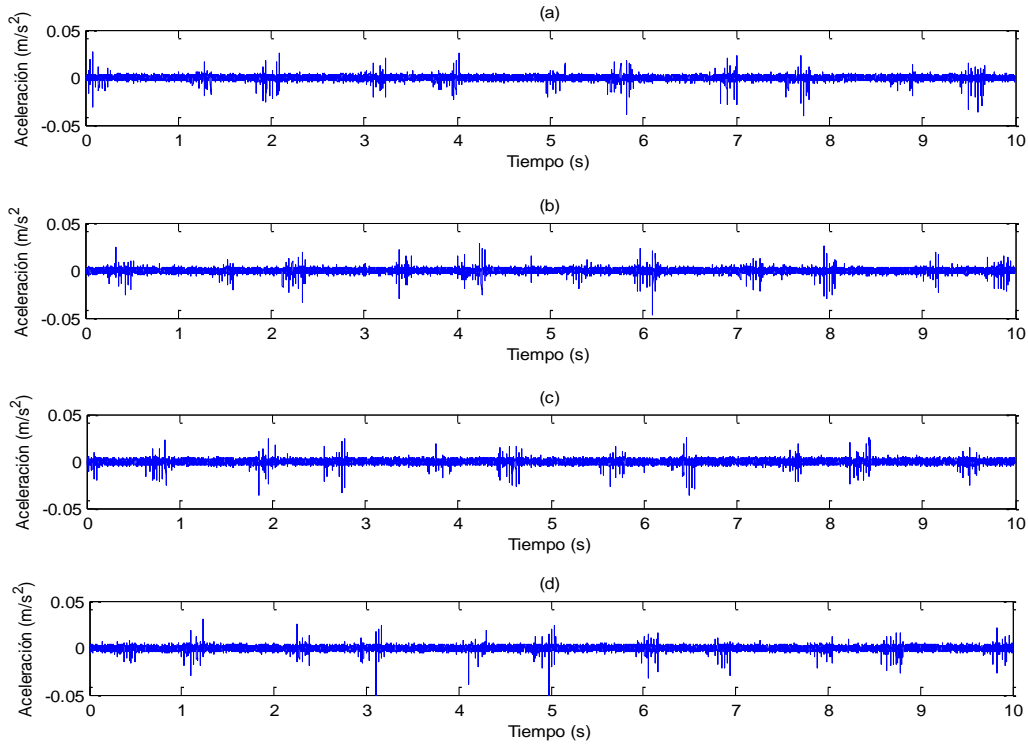


Figura 3-9. Señales en función del tiempo del rodamiento sin defecto a 10 Hz, 50000 muestras (FN10):
(a) primera señal temporal, (b) segunda señal, (c) tercera, (d) cuarta y última.

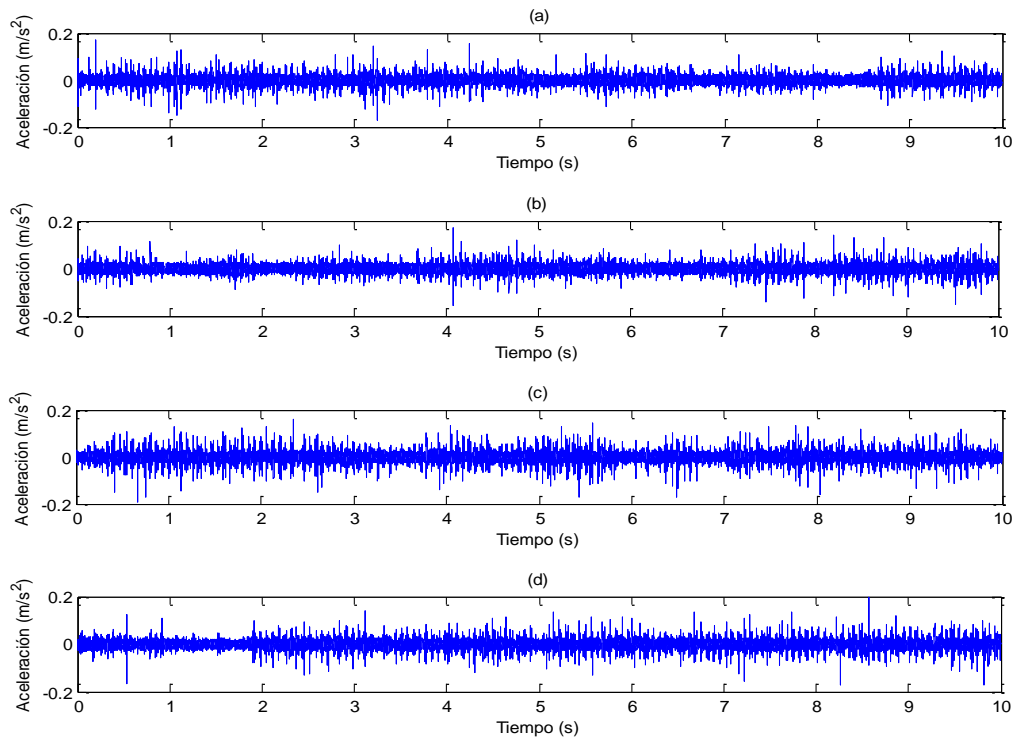


Figura 3-10. Señales temporales del rodamiento con defecto en bola a 20 Hz, 50000 muestras (FB20):
(a) primera señal, (b) segunda, (c) tercera, (d) cuarta.

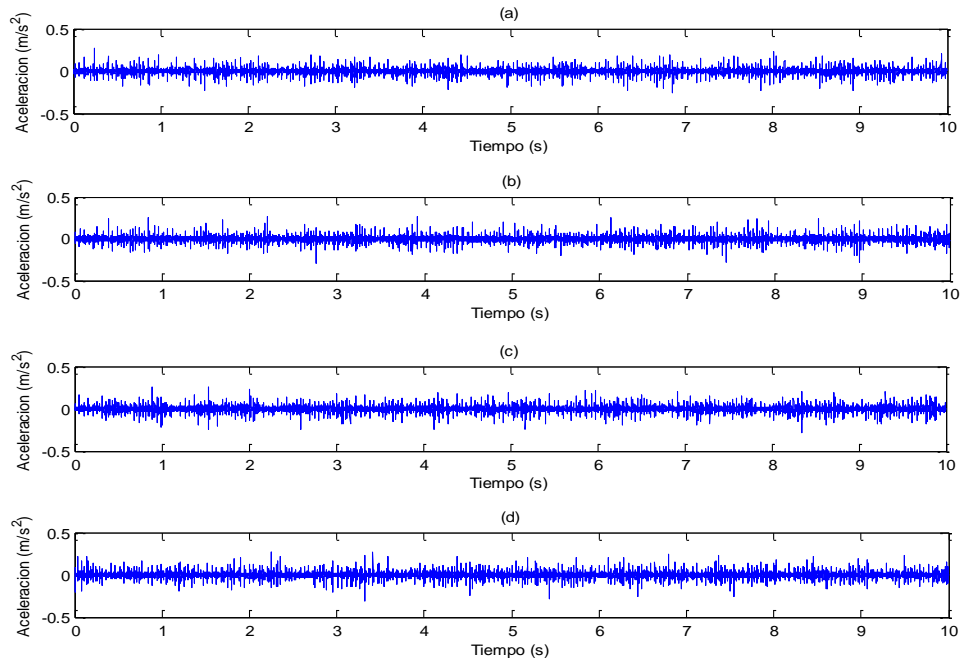


Figura 3-11. Señales temporales del rodamiento con defecto en pista interior a 20 Hz, 50000 muestras (FI20):

(a) primera señal, (b) segunda, (c) tercera, (d) cuarta.

La siguiente figura 3-12 corresponde a las señales temporales del rodamiento con defecto en pista exterior a 30 Hz, pero para abreviar su descripción se va a utilizar su propia nomenclatura (apartado 3.3).

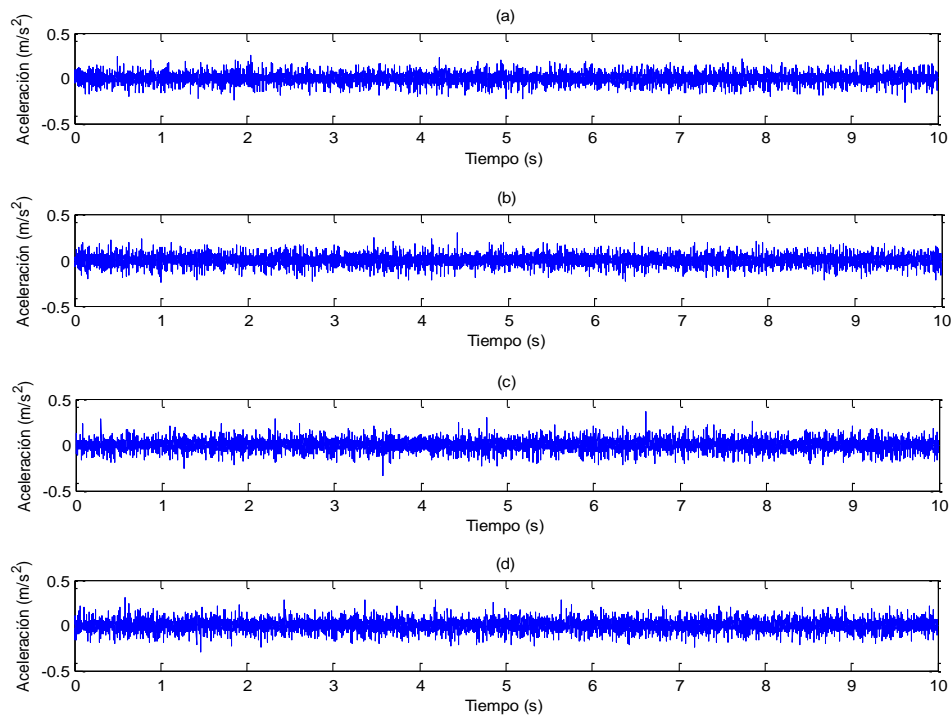


Figura 3-12. Señales temporales FE30:

(a) FE301, (b) FE302, (c) FE303, (d) FE304.



Como se puede observar desde la figura 3-9 hasta la 3-12 las señales de una misma figura son muy similares debido a que se tomaron de manera consecutiva en el tiempo y se ha tenido en cuenta siempre la necesidad de mantener una velocidad estable. Por ello para el estudio sólo se ha utilizado como muestra la primera señal de cada figura; es decir, las que su nomenclatura completa acaba en 1.

Para concluir el apartado 3.4 y también el capítulo 3 cabe decir que no se han representado todas las señales disponibles ya que las conclusiones que se pueden extraer de todas son las mismas, por lo que se ha elegido una señal por cada tipo de rodamiento y a velocidades diferentes en la medida de lo posible (cuatro figuras). En total, habría doce figuras porque que en cada figura hay cuatro señales.



4. PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos a la hora de detectar defectos mediante los tres métodos propuestos: la Transformada Rápida de Fourier, la Transformada Wavelet Estacionaria y la Transformada de Hilbert-Huang.

Cabe destacar que el procesamiento de las señales se ha realizado con Matlab.

4.1. Procesamiento mediante la Transformada Rápida de Fourier

En las figuras 4-1, 4-2, 4-3 y 4-4 se han representado, tanto en el dominio del tiempo (a la izquierda) como en el de la frecuencia (a la derecha), las señales con el objetivo de intentar identificar las frecuencias de defecto.

Las señales han sido de 50000 puntos porque como se ha explicado en el apartado 3.1 la frecuencia de toma de señales era de 5000 Hz, es decir, 5000 puntos en un segundo, y el tiempo de señal es de 10 segundos.

Los círculos señalados se corresponden con las cinco frecuencias de mayor amplitud y se recogerán en una tabla después de cada figura.

Cabe decir que, a priori, se sabe que el resultado no va a ser positivo, ya que la señal va a presentar gran cantidad de ruido pudiendo interferir en el procesamiento con la Transformada de Fourier.

A continuación se van a exponer las figuras que van a contener las señales estudiadas, en función del tiempo, con su respectivo espectro de frecuencias en función del tipo de rodamiento y velocidad ensayada. Seguidamente a cada figura se va a mostrar su tabla correspondiente a las cinco frecuencias más amplificadas.

Del total de las señales tomadas se va a estudiar la primera señal de cada condición de rodamiento y velocidad; es decir, de las cuarenta y ocho señales tomadas se van a estudiar doce.

Como se podrá observar a lo largo de este documento a medida que se incrementa la velocidad de rotación se ven afectadas tanto la señal temporal como el espectro de frecuencias, aumenta la aceleración y la amplitud respectivamente.

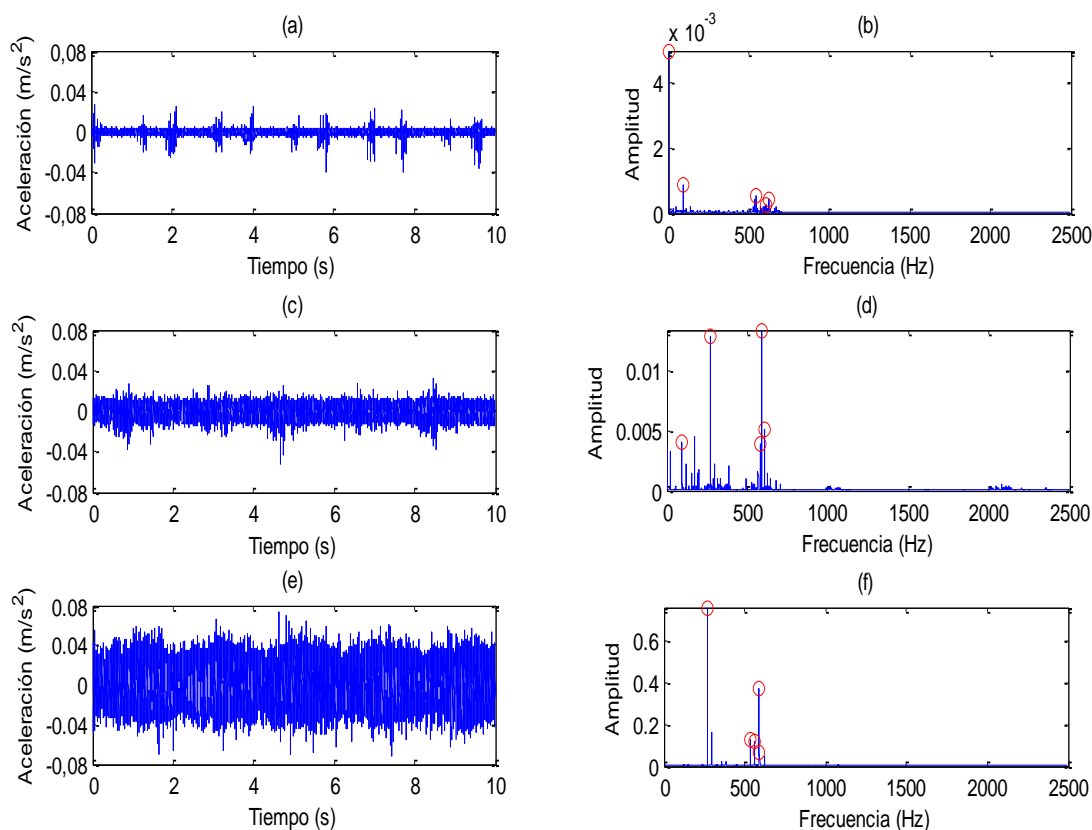


Figura 4-1. Procesamiento de la señal del rodamiento sin defecto mediante la Transformada Rápida de Fourier, 50000 muestras (FN):

(a) señal en función del tiempo sin filtrar a 10 Hz, (b) espectro de frecuencias de la TRF de la señal sin filtrar a 10 Hz, (c) señal temporal sin filtrar a 20 Hz, (d) espectro de frecuencias de la TRF de la señal sin filtrar a 20 Hz, (e) señal temporal sin filtrar a 30 Hz, (f) espectro de frecuencias de la TRF de la señal sin filtrar a 30 Hz.

Tabla 4-1. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud correspondientes a los espectros de frecuencias de la TRF de la señal del rodamiento normal.

	F1 (amplitud)	F2 (amplitud)	F3 (amplitud)	F4 (amplitud)	F5 (amplitud)
10 Hz	0 (0.0009)	97.3 (0.0009)	548.2 (0.0005)	606.5 (0.0002)	622.5 (0.0004)
20 Hz	97.4 (0.004)	274 (0.0131)	584.6 (0.0039)	587.1 (0.0135)	606.9 (0.0052)
30 Hz	266.1 (0.7675)	532.2 (0.1245)	559.9 (0.1148)	587.6 (0.3792)	589.7 (0.0682)

Cuando una de las cinco frecuencias máximas, las que su pico se encuentra rodeada con un círculo, corresponda con el valor 0 no va a tener ningún efecto para el estudio, es decir, se va a despreciar su valor y el de su amplitud.

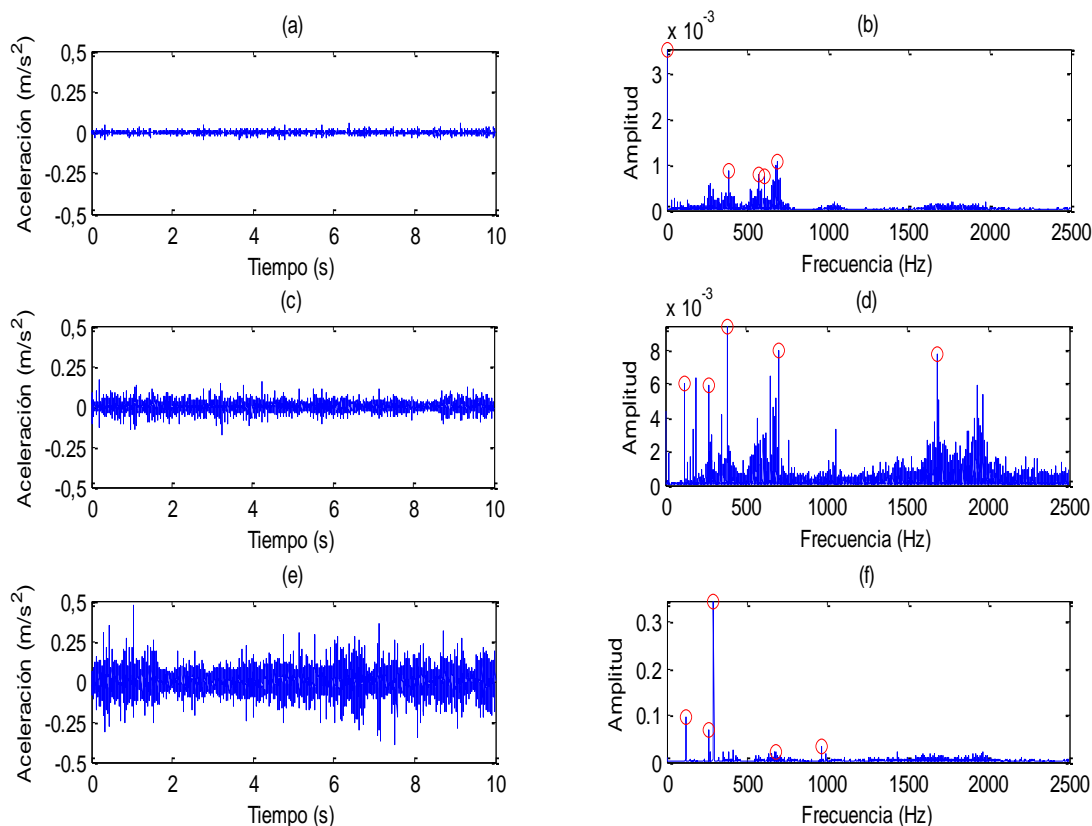


Figura 4-2. FB:

(a) señal en función del tiempo sin filtrar a 10 Hz, (b) espectro de frecuencias de la TRF de la señal sin filtrar a 10 Hz, (c) señal temporal sin filtrar a 20 Hz, (d) espectro de frecuencias de la TRF de la señal sin filtrar a 20 Hz, (e) señal temporal sin filtrar a 30 Hz, (f) espectro de frecuencias de la TRF de la señal sin filtrar a 30 Hz.

Tabla 4-2. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud correspondientes a los espectros de frecuencias de FB.

	F1 (amplitud)	F2 (amplitud)	F3 (amplitud)	F4 (amplitud)	F5 (amplitud)
10 Hz	0	387.7 (0.0009)	571.8 (0.0008)	607.6 (0.0007)	688.1 (0.0011)
20 Hz	118.6 (0.006057)	273.2 (0.0059)	388.2 (0.0095)	699.1 (0.008)	1684.6 (0.0078)
30 Hz	119.1 (0.0946)	265.4 (0.068)	292.5 (0.3459)	682.3 (0.0219)	962.7 (0.0335)

Recordando el apartado 3.2 el cálculo de la frecuencia de defecto del rodamiento se basaba en sus características y dimensiones, y en la velocidad angular de éste. Como se puede observar en la tabla 3-2 las frecuencias de defecto en bola de un rodamiento MB Manufacturing ER10K a 20 y 30 Hz son respectivamente 39.8212865 y 59.7319298 Hz.



En los espectros de frecuencia no siempre aparece directamente la frecuencia del defecto sino que ésta puede manifestarse en alguno de sus múltiplos, o también llamados armónicos, e incluso en combinación con otras frecuencias como puede ser la de la red eléctrica (50 Hz), la velocidad de giro...

Cabe destacar de la figura 4-2 que el valor de frecuencia 118.6 Hz que corresponde a uno de los 5 máximos representa el tercer múltiplo de la frecuencia de defecto en bola del rodamiento a una velocidad de 20 Hz y con el valor de 119.1 Hz que corresponde al doble de la frecuencia de defecto en bola a 30 Hz.

Como se puede comprobar se ha producido un margen de error entre la frecuencia teórica del defecto y la puesta en práctica de la misma; por ejemplo, el tercer múltiplo teórico de la frecuencia de defecto en bola a 20 Hz es 119.4638595 Hz y en el desarrollo práctico se ha obtenido como resultado 118.6 Hz.

En el apartado posterior 4.5 se elaborará un estudio más detallado de las frecuencias significativas con el fin de comprobar el margen de error.

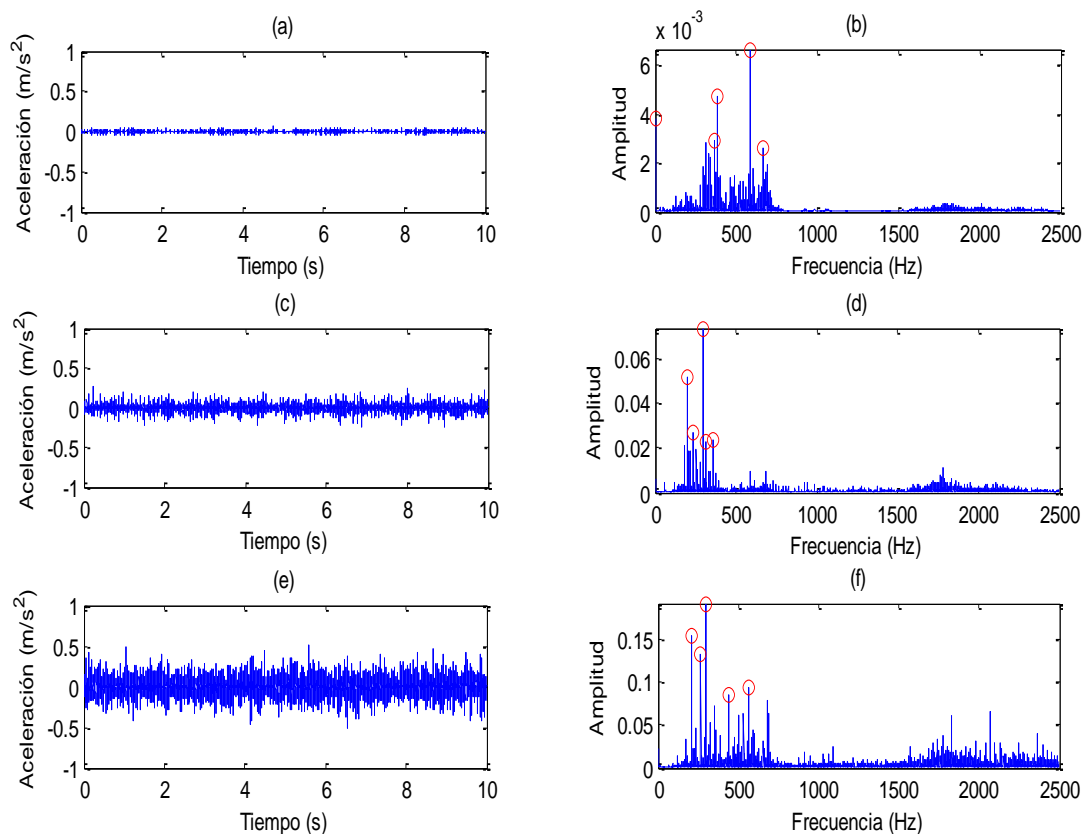


Figura 4-3. FI:

(a) señal en función del tiempo sin filtrar a 10 Hz, (b) espectro de frecuencias de la señal sin filtrar a 10 Hz, (c) señal temporal FI201, (d) espectro de frecuencias de FI201, (e) señal temporal FI301, (f) espectro de frecuencias de FI301.

Tabla 4-3. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud de los espectros de frecuencias de FI.

	<i>F1</i> (amplitud)	<i>F2</i> (amplitud)	<i>F3</i> (amplitud)	<i>F4</i> (amplitud)	<i>F5</i> (amplitud)
10 Hz	0	361.5 (0.0029)	380.8 (0.0047)	586 (0.0067)	664 (0.0026)
20 Hz	195.4 (0.0512)	235.4 (0.0265)	294.9 (0.0733)	315.6 (0.0229)	354.4 (0.0239)
30 Hz	207.3 (0.1551)	266.9 (0.1336)	295.4 (0.1926)	443.1 (0.0854)	562.3 (0.0945)

Teniendo en cuenta que la frecuencia de defecto del rodamiento en su pista interior a 20 Hz corresponde con 98.961194 Hz se refleja en la tabla 4-3 su segundo y tercer múltiplo, 195.4 y 294.9 Hz respectivamente. Lo mismo sucede a la velocidad de 30 Hz, cuya frecuencia de defecto en pista interior es 148.441791 Hz y aparecen su segundo y tercer múltiplo, 295.4 y 443.1 Hz respectivamente.

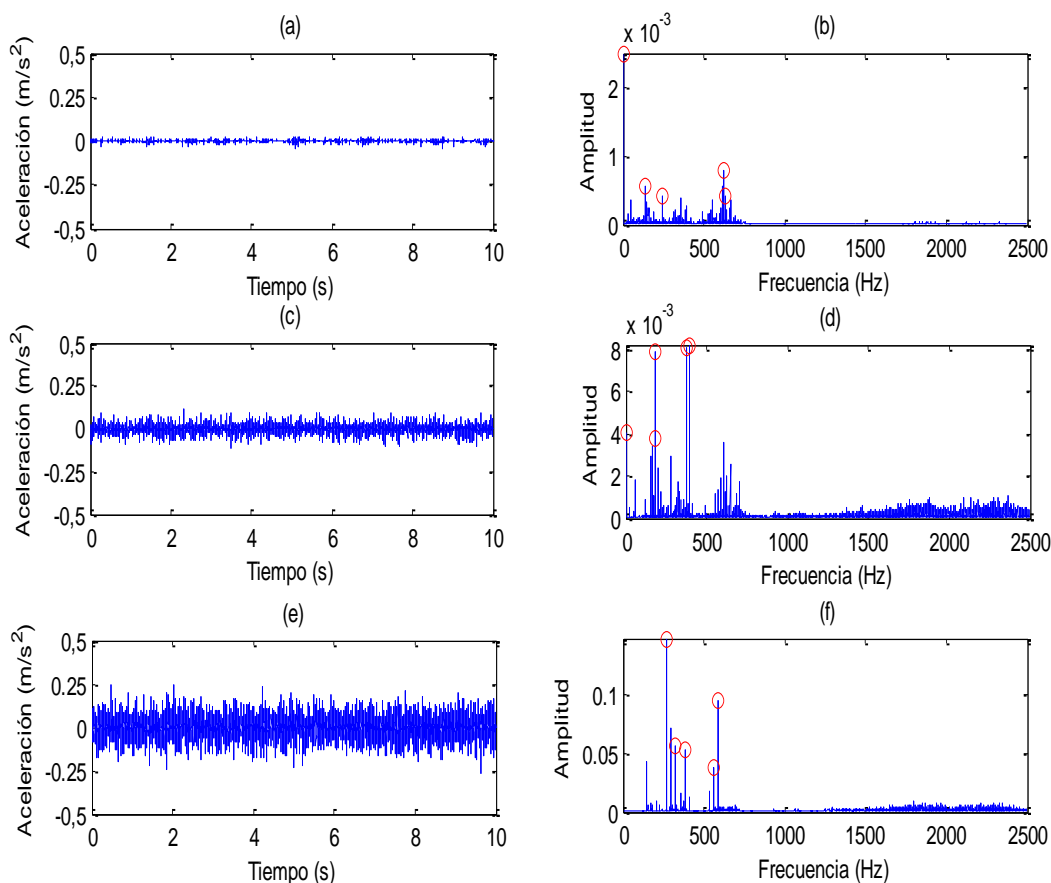


Figura 4-4. FE:

(a) señal en función del tiempo FE101, (b) espectro de frecuencias de FE101, (c) señal temporal FE201, (d) espectro de frecuencias de FE201, (e) señal temporal sin filtrar FE301, (f) espectro de frecuencias de FE301.

Tabla 4-4. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud de los espectros de frecuencias de FE.

	<i>F1</i> (amplitud)	<i>F2</i> (amplitud)	<i>F3</i> (amplitud)	<i>F4</i> (amplitud)	<i>F5</i> (amplitud)
10 Hz	0	137.1 (0.0006)	243.8 (0.0004)	624 (0.0008)	633.9 (0.0004)
20 Hz	0	177.1 (0.0079)	177.5 (0.0038)	372.7 (0.0081)	391.2 (0.0082)
30 Hz	266.5 (0.147)	326.2 (0.0552)	380.5 (0.0533)	560.7 (0.0377)	588.4 (0.0943)

Como muestra la tabla 4-4 el valor de frecuencia 243.8 Hz corresponde con el octavo múltiplo de la frecuencia de defecto en pista exterior a 10 Hz, 30.519403 Hz.

4.2. Filtrado mediante la Transformada Wavelet Estacionaria

A continuación se ha utilizado el método anterior para la evaluación del estado del rodamiento, pero con la señal filtrada. El filtro que se va a utilizar es la TWE. La aplicación del filtro a la señal obtenida del banco de ensayos se ha realizado en Matlab, con la herramienta de Wavelet que dispone dicho programa.

En la figura siguiente 4-5 se puede ver el menú principal de la herramienta de Wavelet y la opción elegida: *TWE Denoising 1-D*, dentro de *Specialized Tools 1-D*.

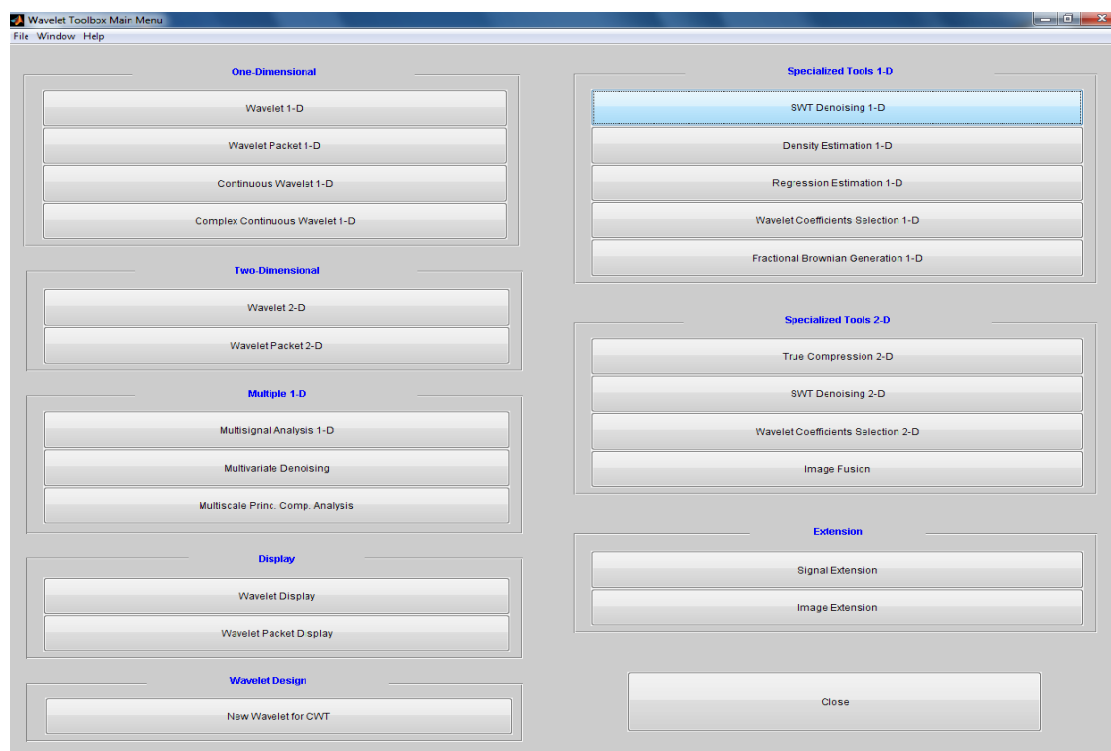


Figura 4-5. Menú principal de la herramienta de Wavelet: herramientas especializadas 1-D: filtrado TWE 1-D.



En primer lugar se elige la opción *Load Signal* dentro del menú *File*; es decir, se va a proceder a cargar la señal original, como se puede ver en la figura 4-6.

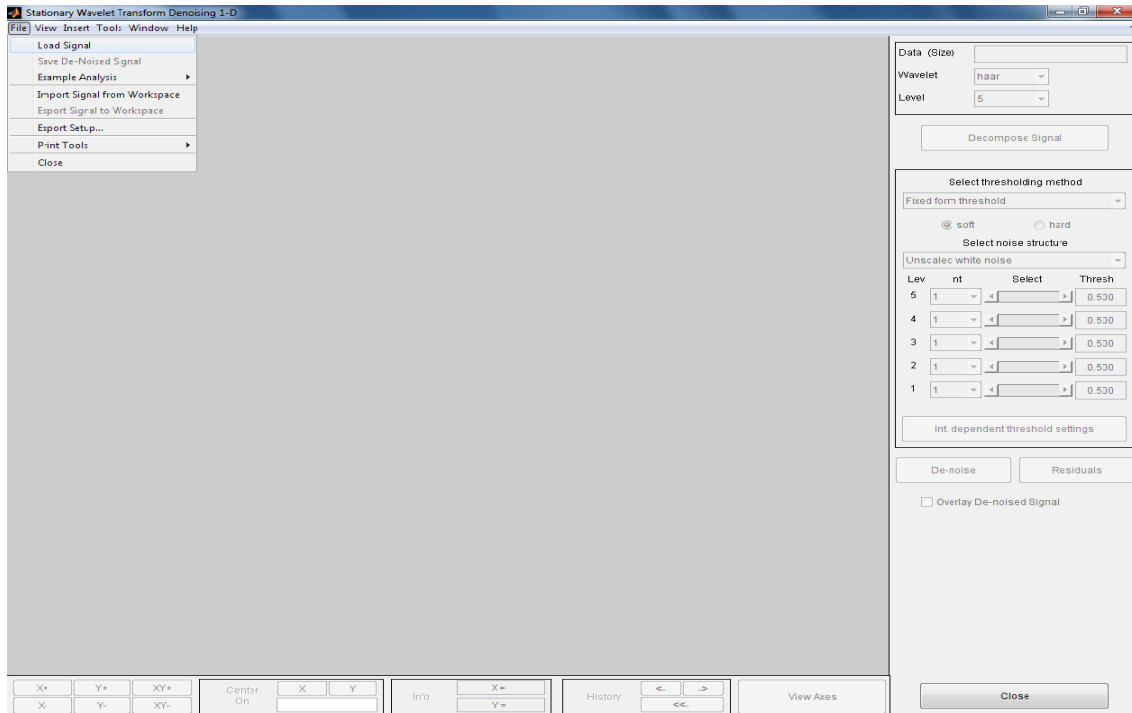


Figura 4-6. Archivo: cargar señal.

Una vez cargada una señal genérica VXYZ se muestra en pantalla a lo largo de sus 10 segundos de toma de señal como se puede apreciar en la figura 4-7. Seguidamente se procede a la elección del tipo de filtrado Wavelet, tipo db (daubechie) 6, nivel 3. Y se descompone la señal.

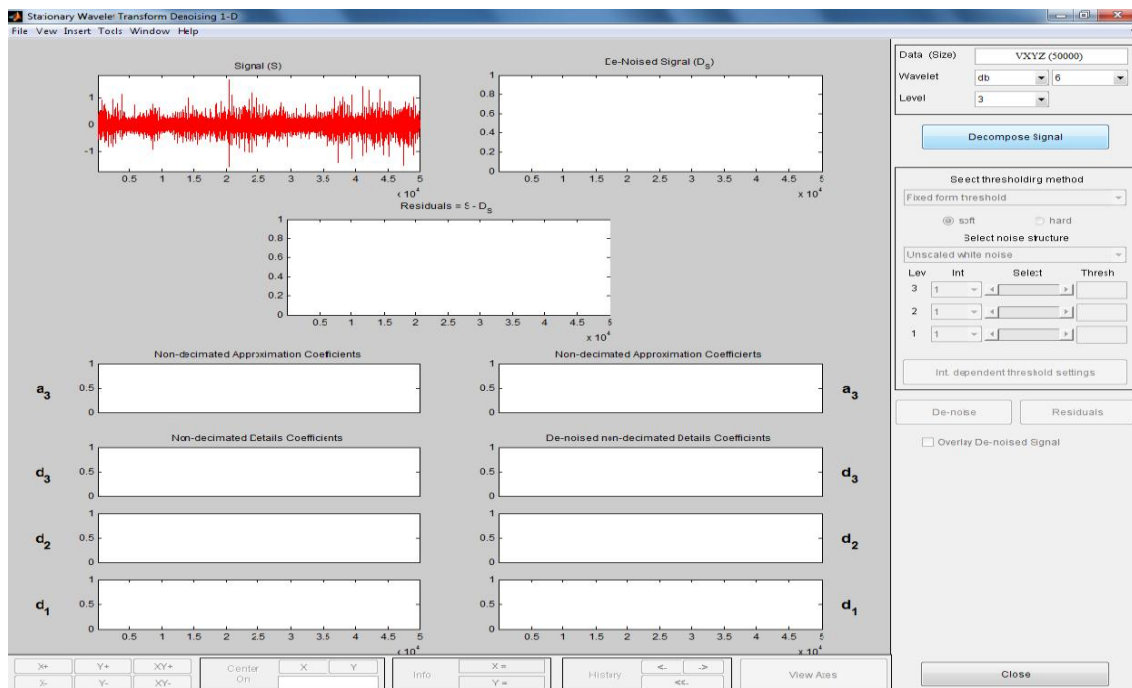


Figura 4-7. Descomponer señal.

Posteriormente se descompone la señal (figura 4-8) y, como se ha expuesto en el apartado 2.2, aparecen sus pertinentes coeficientes de aproximación y de detalles en función del nivel de descomposición elegido, el tercer nivel en este caso.

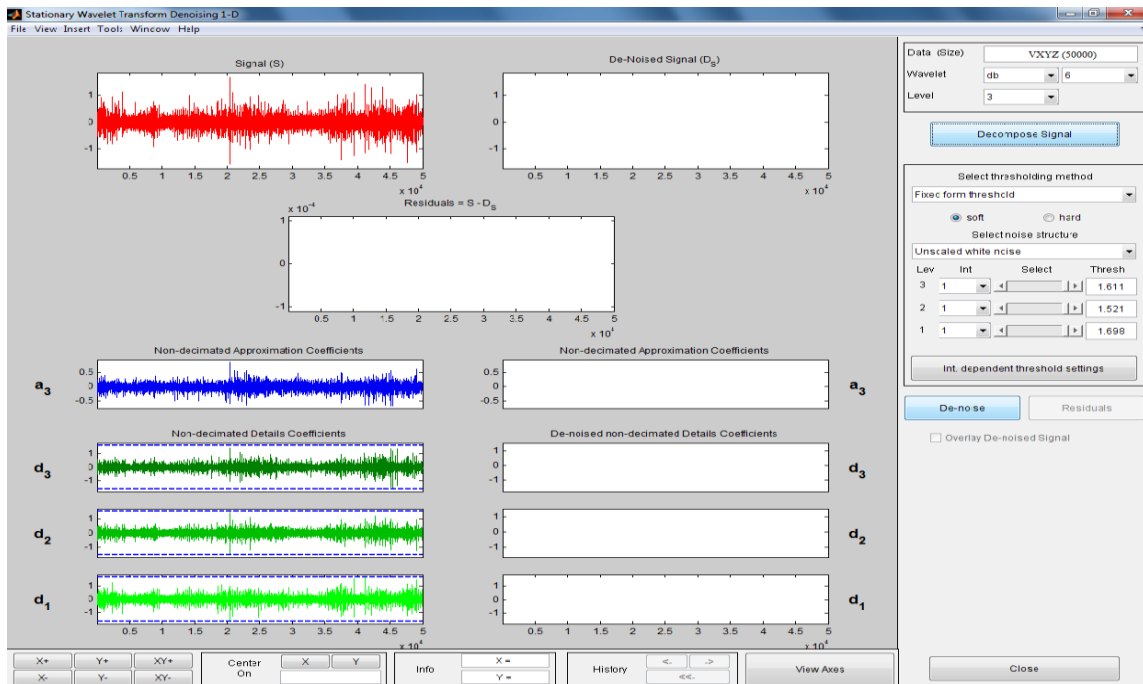


Figura 4-8. Filtrar.

Y por último se filtra la señal apareciendo la propia señal ya filtrada, que era lo que se buscaba, y además los residuos (figura 4-9), que se pueden definir como la propia señal original menos la señal filtrada. De nuevo se encuentran los coeficientes de aproximación y los de detalles, pero estos últimos filtrados.

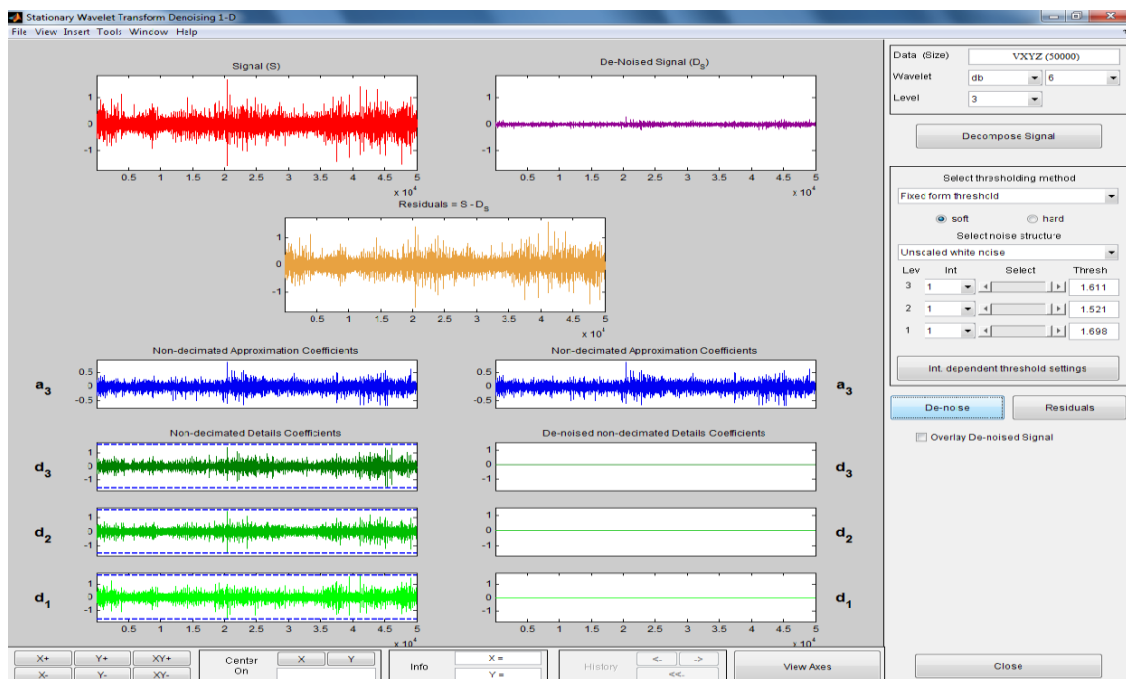


Figura 4-9. Señal filtrada.

El resultado de aplicar la Transformada Wavelet Estacionaria, como método de filtrado a las mismas señales que en el apartado anterior 4.1, y posteriormente emplear la Transformada Rápida de Fourier sobre la envolvente, para obtener el espectro de frecuencias de ésta, se puede ver desde la figura 4-10 a la 4-13 y a continuación de cada figura se hallará la tabla correspondiente con las cinco mayores frecuencias de cada espectro.

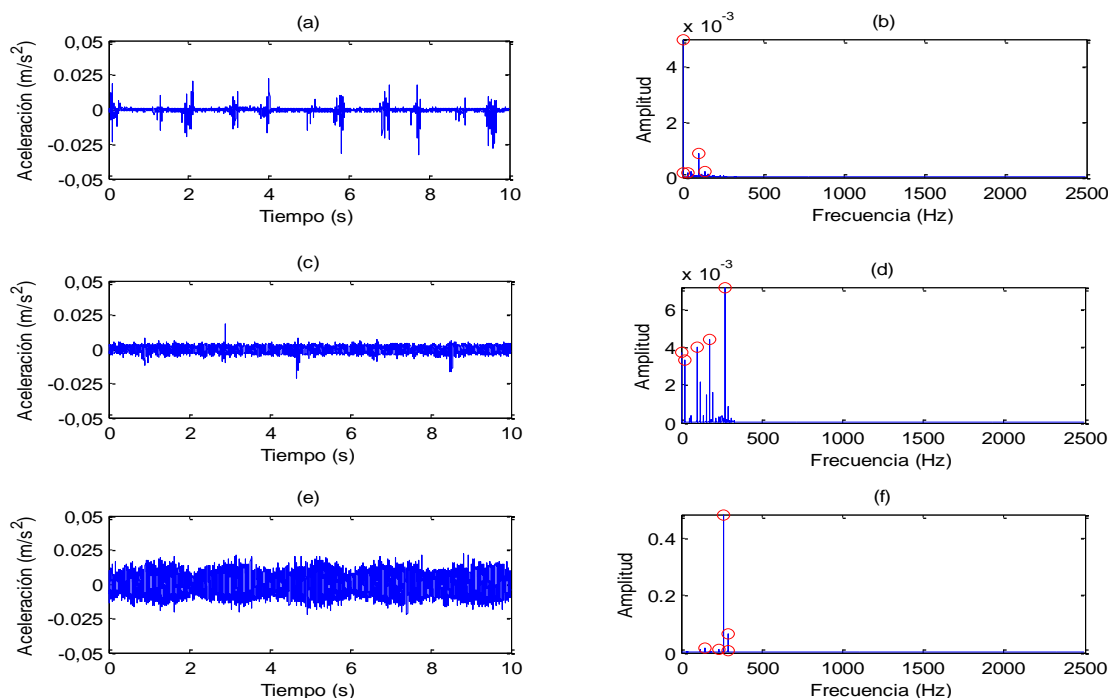


Figura 4-10. TRF de la señal del rodamiento sin defecto filtrada mediante la Transformada Wavelet Estacionaria, 50000 muestras (WN):

(a) señal en función del tiempo filtrada mediante la Transformada Wavelet Estacionaria 10 Hz, (b) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la Transformada Wavelet Estacionaria a 10 Hz, (c) señal temporal filtrada mediante la TWE a 20 Hz, (d) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la TWE a 20 Hz, (e) señal temporal filtrada mediante la TWE a 30 Hz, (f) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la TWE a 30 Hz.

Tabla 4-5. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud correspondientes a los espectros de frecuencias de la TRF de la señal del rodamiento normal filtrada mediante la TWE.

	<i>F1 (amplitud)</i>	<i>F2 (amplitud)</i>	<i>F3 (amplitud)</i>	<i>F4 (amplitud)</i>	<i>F5 (amplitud)</i>
<i>10 Hz</i>	<i>0</i>	<i>0.6</i>	<i>28.9 (0.0001)</i>	<i>97.3 (0.0009)</i>	<i>136.8 (0.0002)</i>
<i>20 Hz</i>	<i>0</i>	<i>19.8 (0.0033)</i>	<i>97.4 (0.004)</i>	<i>176 (0.0045)</i>	<i>274 (0.0072)</i>
<i>30 Hz</i>	<i>146.9 (0.0151)</i>	<i>236.3 (0.0101)</i>	<i>266.1 (0.4836)</i>	<i>293.8 (0.0642)</i>	<i>294.8 (0.0089)</i>

En el rodamiento normal no puede existir frecuencia de defecto al no tener ninguno, entonces en este caso la frecuencia característica va a ser la velocidad de giro y la frecuencia de la red eléctrica, que es una constante de 50 Hz.

En cuanto a la velocidad de giro de 10 Hz resulta interesante la frecuencia de 28.9 Hz, ya que corresponde con el triple de la velocidad. Más evidente es la frecuencia de 19.8 Hz que se refiere a la propia velocidad de giro de 20 Hz.

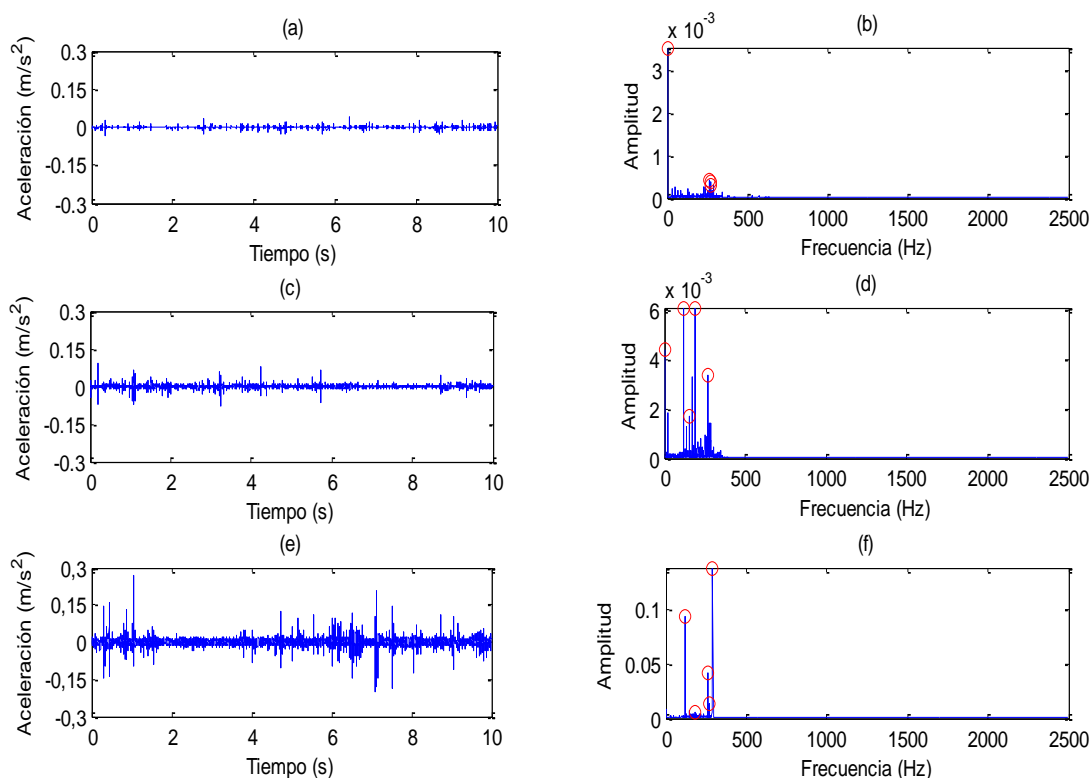


Figura 4-11. WB:

(a) señal en función del tiempo filtrada mediante la TWE a 10 Hz, (b) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la TWE a 10 Hz, (c) señal temporal filtrada mediante la TWE a 20 Hz, (d) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la TWE a 20 Hz, (e) señal temporal filtrada mediante la TWE a 30 Hz, (f) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la TWE a 30 Hz.

Tabla 4-6. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud correspondientes a los espectros de frecuencia de WB.

	F1 (amplitud)	F2 (amplitud)	F3 (amplitud)	F4 (amplitud)	F5 (amplitud)
10 Hz	0	260.3 (0.0004)	267.8 (0.0004)	268.5 (0.0003)	269.3 (0.0003)
20 Hz	0	118.6 (0.0061)	158.2 (0.0017)	194.1 (0.0061)	273.2 (0.0034)
30 Hz	119.1 (0.0946)	181.7 (0.006)	265.4 (0.04256)	266.5 (0.01268)	292.5 (0.1389)



Al observar detenidamente la tabla 4-6 la frecuencia 260.3 Hz representa el décimo tercer múltiplo de la frecuencia de defecto en bola a una velocidad de giro de 10 Hz, que es 19.9106433 Hz.

En cuanto a la velocidad de giro de 20 Hz las frecuencias 118.6 y 158.2 Hz corresponden con el tercer y cuarto múltiplo de la frecuencia de defecto en bola respectivamente, que es 39.8212865 Hz.

Y haciendo referencia a la velocidad de giro de 30 Hz cabe destacar que las frecuencias 119.1 y 181.7 Hz se refieren al segundo y tercer múltiplo de la frecuencia de defecto en bola respectivamente, 59.7319298 Hz.

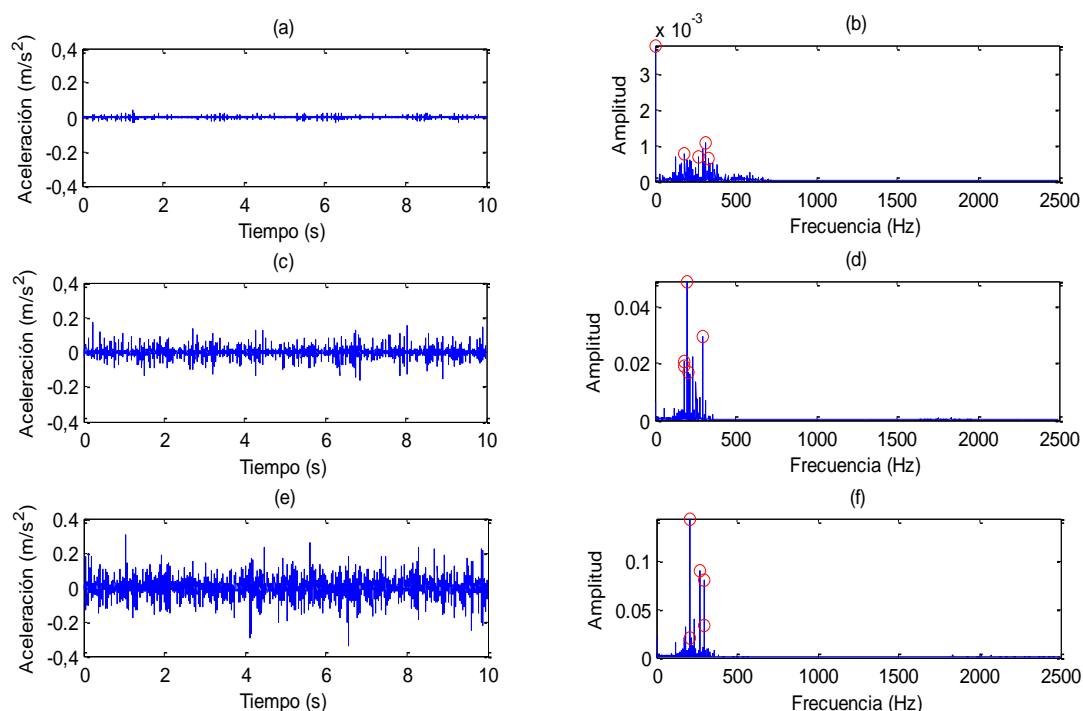


Figura 4-12. WI:

(a) señal en función del tiempo WI101, (b) espectro de frecuencias de WI101, (c) señal temporal filtrada WI201, (d) espectro de frecuencias de WI201, (e) señal temporal filtrada WI301, (f) espectro de frecuencias de WI301.

Tabla 4-7. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud de los espectros de frecuencia de WI.

	<i>F1</i> (amplitud)	<i>F2</i> (amplitud)	<i>F3</i> (amplitud)	<i>F4</i> (amplitud)	<i>F5</i> (amplitud)
10 Hz	0	185.5 (0.0008)	273.3 (0.0007)	312.3 (0.0011)	331.6 (0.0006)
20 Hz	177 (0.0207)	177.6 (0.019)	195.4 (0.0491)	210.5 (0.0169)	294.9 (0.0297)
30 Hz	207.3 (0.1453)	208.6 (0.0212)	266.9 (0.0914)	295.4 (0.0808)	296.7 (0.033)



Como muestra la tabla 4-7 los valores de frecuencia 195.4 y 294.9 Hz corresponden con el segundo y tercer múltiplo de la frecuencia de defecto en pista interior, 98.961194 Hz a una velocidad de 20 Hz.

A la velocidad de 30 Hz se encuentran dos valores de frecuencias muy cercanos entre sí, 295.4 y 296.7 Hz; por ello, se considera el valor de 296.7 Hz como el segundo múltiplo de la frecuencia de defecto de pista interior que es 148.441791 Hz.

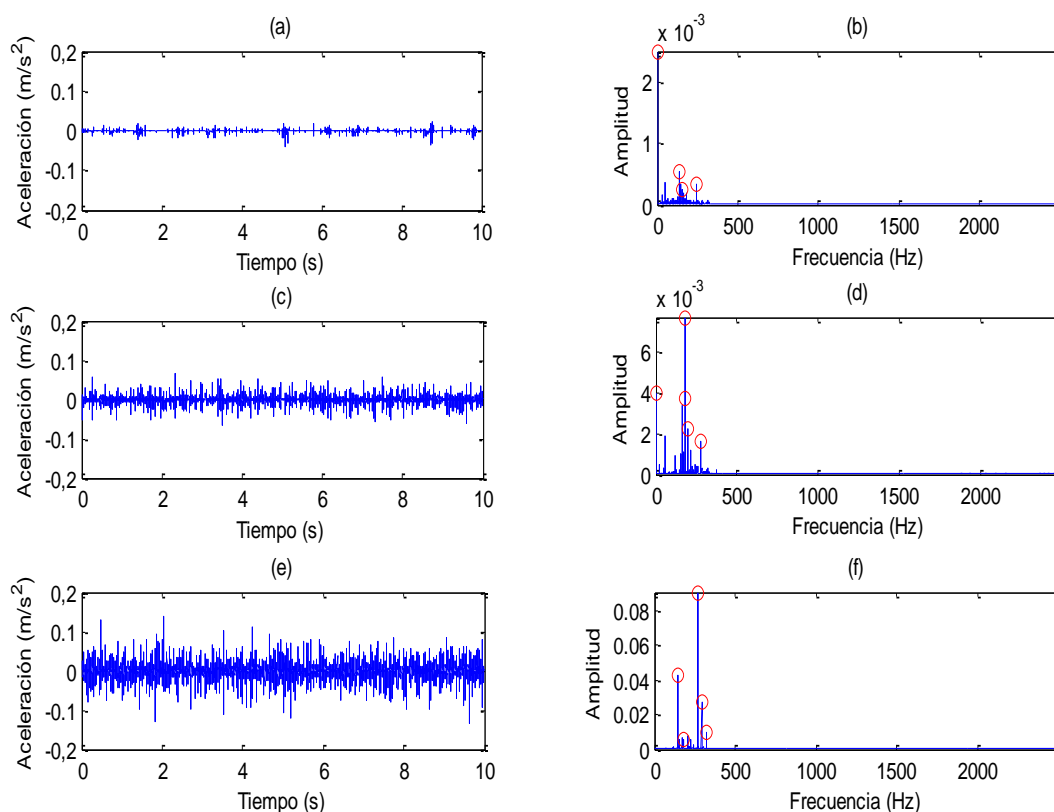


Figura 4-13. WE:

(a) señal en función del tiempo WE101, (b) espectro de frecuencias de WE101, (c) señal temporal filtrada WE201, (d) espectro de frecuencias de WE201, (e) señal temporal WE301, (f) espectro de frecuencias de WE301.

Tabla 4-8. Valores de las frecuencias, en Hz, de mayor amplitud de los espectros de frecuencias de WE.

	F1 (amplitud)	F2 (amplitud)	F3 (amplitud)	F4 (amplitud)	F5 (amplitud)
10 Hz	0	137.1 (0.0006)	155.5 (0.0003)	159.1 (0.0002)	243.8 (0.0003)
20 Hz	0	177.1 (0.0078)	177.5 (0.0037)	195.6 (0.0022)	274.9 (0.0016)
30 Hz	147.1 (0.04295)	183.3 (0.0059)	266.5 (0.0909)	294.2 (0.0275)	326.2 (0.0093)



En la tabla 4-8 se refleja que los valores de las frecuencias 155.5 y 243.8 Hz se corresponden con el quinto y octavo múltiplo de la frecuencia de defecto en pista exterior, 30.519403 Hz, a una velocidad de giro de 10 Hz.

A la velocidad de 30 Hz cabe destacar que la frecuencia 183.3 Hz es el segundo múltiplo de la frecuencia de defecto en pista exterior, que es 91.558209 Hz.

4.3. Filtrado mediante la Transformada de Hilbert-Huang

Ahora es el turno de la Transformada Hilbert-Huang como método de filtrado y el procesamiento se seguirá llevando a cabo con la Transformada Rápida de Fourier.

En las figuras 4-14, 4-15, 4-16 y 4-17 se muestran todas las Funciones Modales Intrínsecas (FMI) y los residuos obtenidos tras la Descomposición Modal Empírica (DME) para la señal extraída de un rodamiento sin defecto girando a 10 Hz, así como el espectro de frecuencias obtenido tras aplicar la Transformada de Hilbert-Huang.

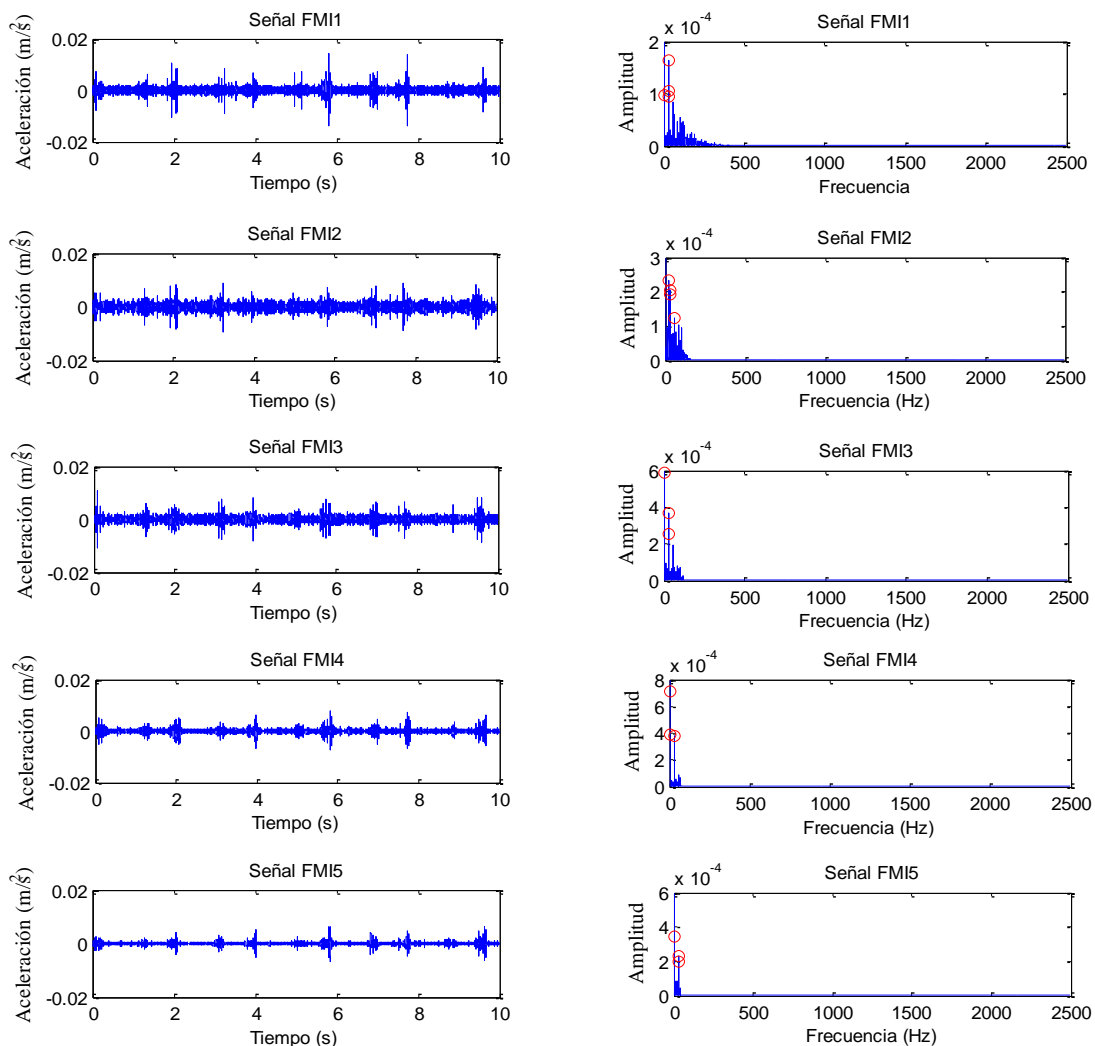


Figura 4-14. Transformada Hilbert-Huang de las cinco primeras FMI del rodamiento sin defecto a 10 Hz, 50000 muestras (HN101).

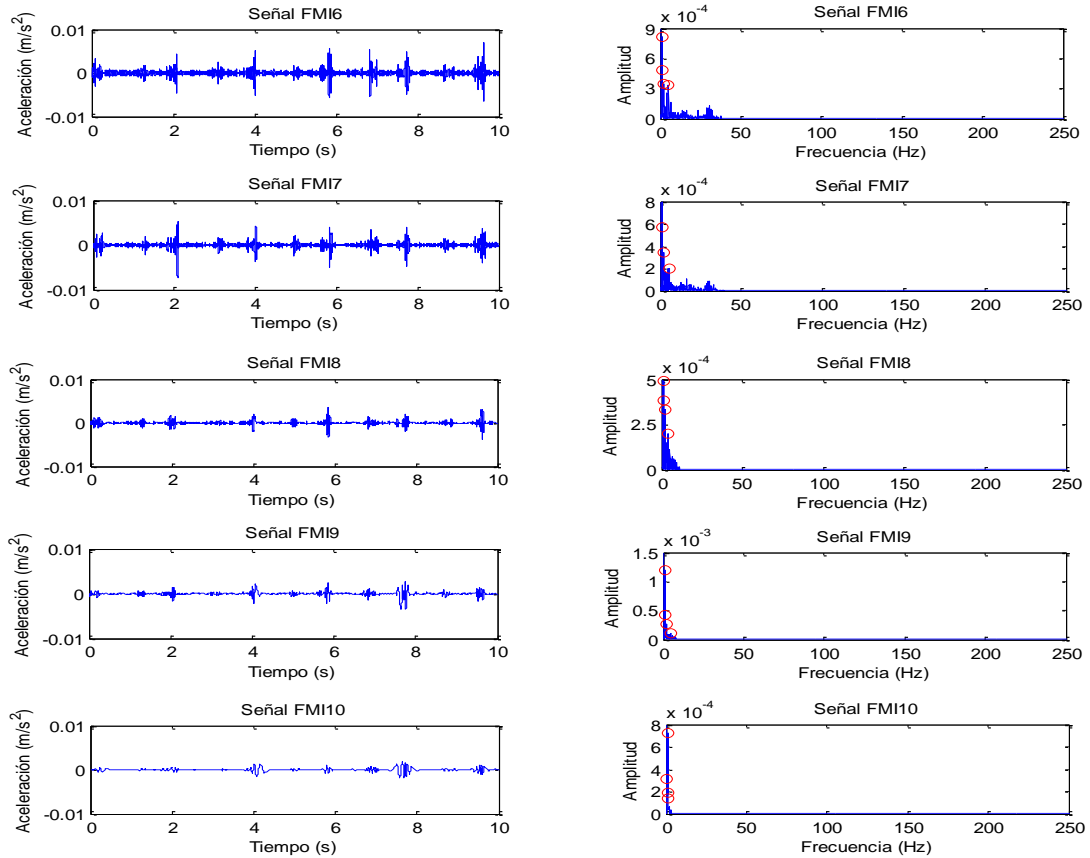


Figura 4-15. FMI desde la 6 hasta la 10 de HN101.

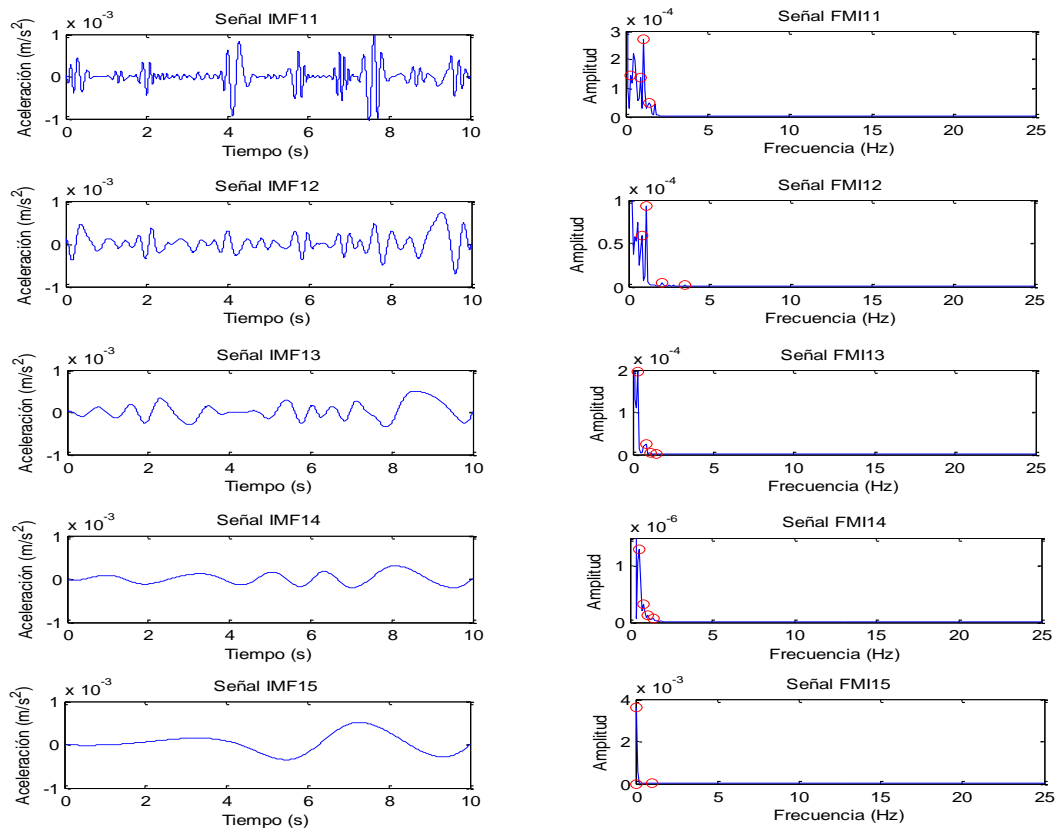


Figura 4-16. FMI desde la 11 hasta la 15 de HN101.

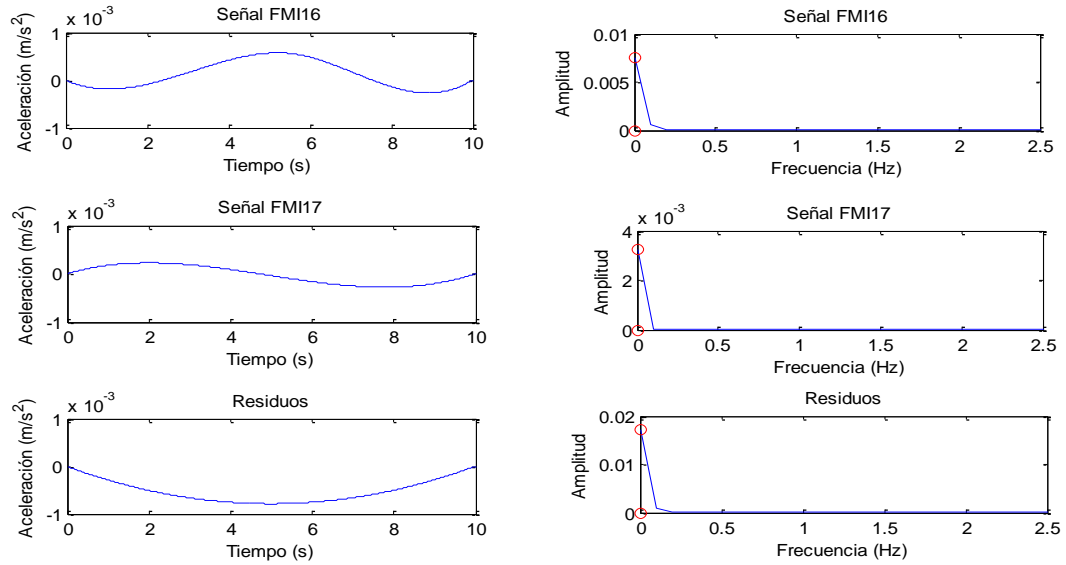


Figura 4-17. Dos últimas FMI y residuos de HN101.

Al haber tantas FMI por cada rodamiento y velocidad se va a proceder a elegir las primeras, ya que poseen más información útil para su estudio como se puede apreciar en la figura 4-18.

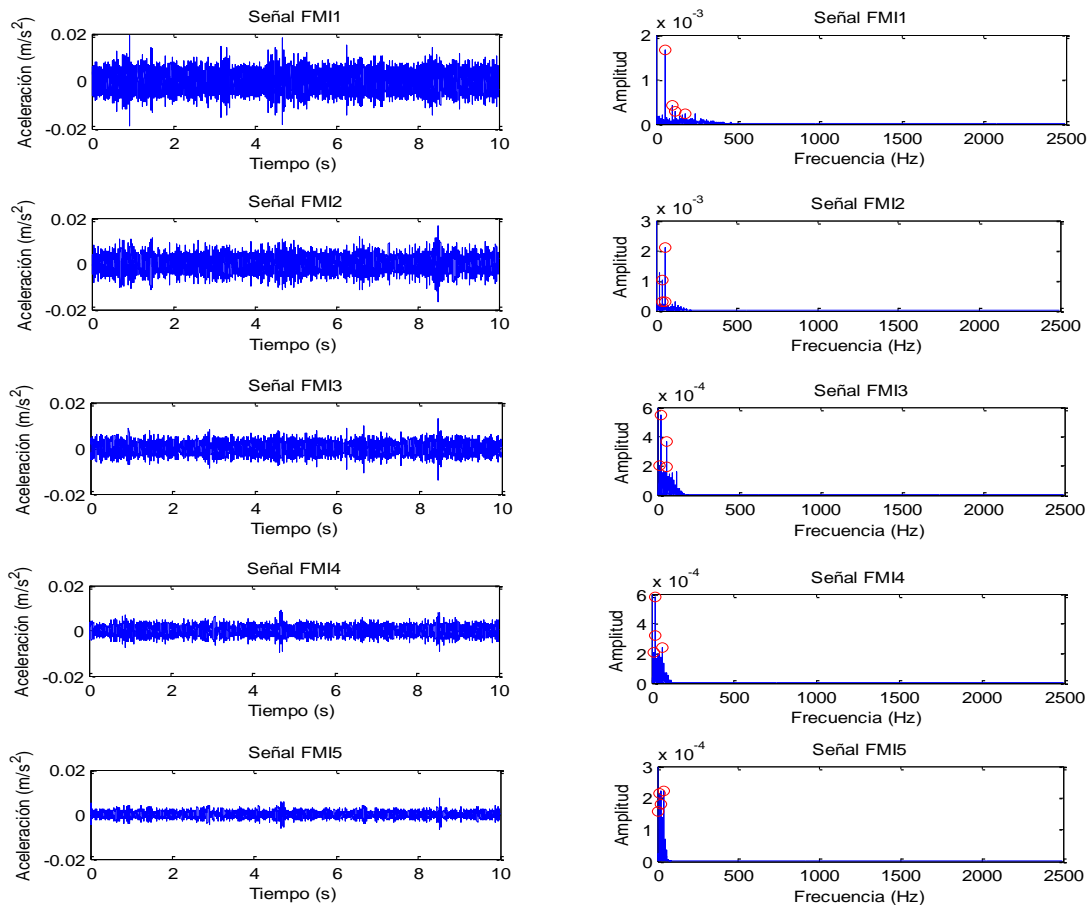


Figura 4-18. Transformada Hilbert-Huang de las cinco primeras FMI del rodamiento sin defecto a 20 Hz, 50000 muestras (HN201).

Concretamente para el análisis del espectro de frecuencia se utilizará la primera FMI por ser la más relevante. A continuación, se muestra en la figura 4-19 la primera FMI de la señal filtrada por la THH de un rodamiento sin defecto a 30 Hz, 50000 muestras.

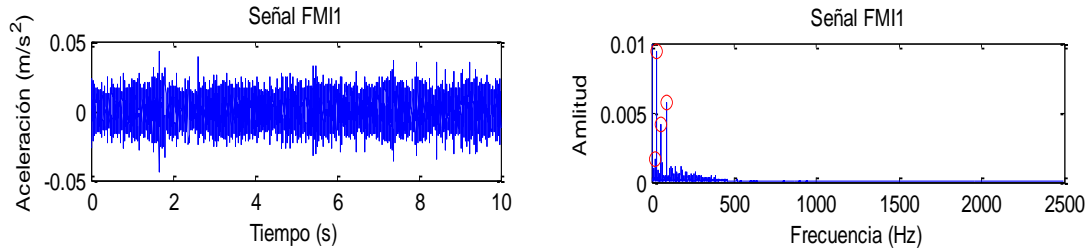


Figura 4-19. Primera FMI de HN301.

4.4. Análisis comparativo de los métodos desarrollados

En este apartado 4.4 se van a comparar los tres métodos utilizados; es decir; el procesamiento con la Transformada Rápida de Fourier, el filtrado con la Transformada Wavelet Estacionaria con posterior procesamiento de la TRF y, por último, el filtrado de la Transformada Hilbert-Huang más el análisis con la TRF.

Debido al número de señales estudiadas, una por cuatro tipos distintos de rodamiento y a tres velocidades diferentes, se va a exponer en este análisis comparativo cuatro figuras (una por cada tipo de rodamiento).

En la siguiente figura 4-20 se muestran las señales adquiridas de un rodamiento sin defecto a 10 Hz. Está compuesta de seis gráficas, en la primera columna [(a), (c) y (e)] se encuentran las señales temporales con su correspondiente filtrado y en la segunda [(b), (d) y (f)] están sus correspondientes espectros. Si se explica por filas, en la primera interviene directamente la Transformada Rápida de Fourier, en la segunda se realiza previamente el filtrado de la Transformada Wavelet Estacionaria y en la tercera la Transformada Hilbert-Huang.

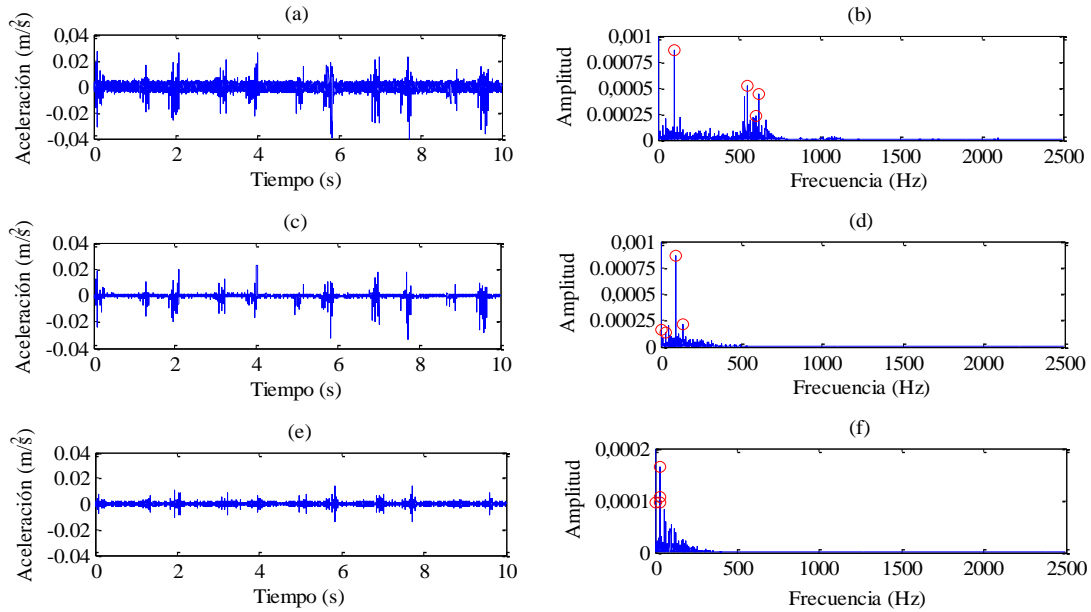


Figura 4-20. Rodamiento sin defecto a 10 Hz, 50000 muestras (N101):

(a) señal en función del tiempo sin filtrar, (b) espectro de frecuencias de la TRF de la señal sin filtrar, (c) señal temporal filtrada mediante la Transformada Wavelet, (d) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la TW, (e) señal temporal filtrada mediante la Transformada Hilbert-Huang, (f) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la THH.

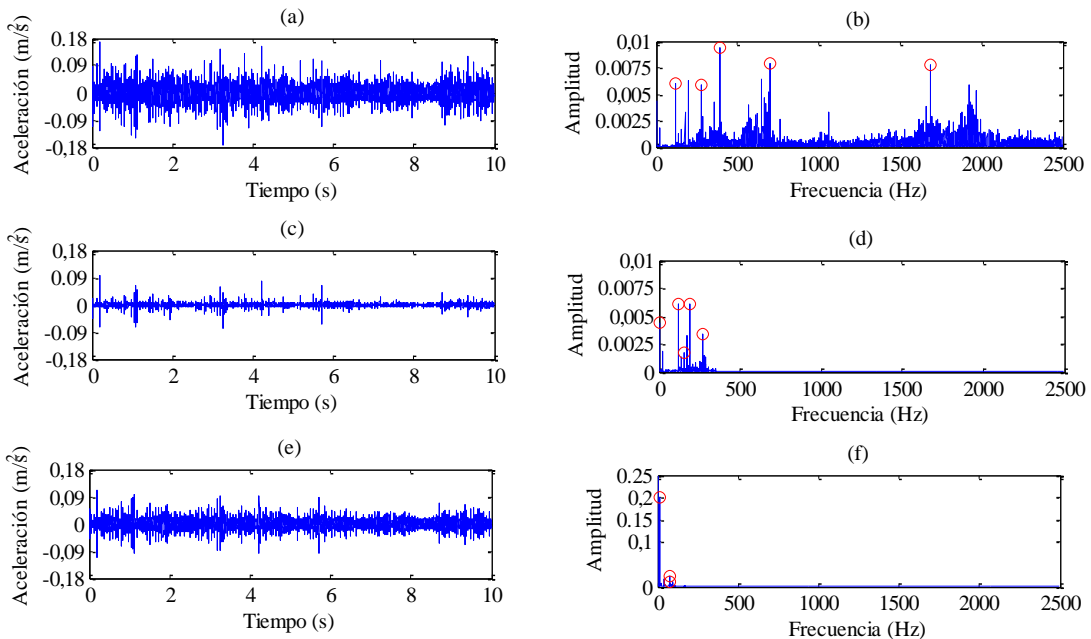


Figura 4-21. B201:

(a) señal en función del tiempo sin filtrar, (b) espectro de frecuencias de la TRF de la señal sin filtrar, (c) señal temporal filtrada mediante la Transformada Wavelet, (d) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la TW, (e) señal temporal filtrada mediante la Transformada Hilbert-Huang, (f) espectro de frecuencias de la TRF de la señal filtrada mediante la THH.

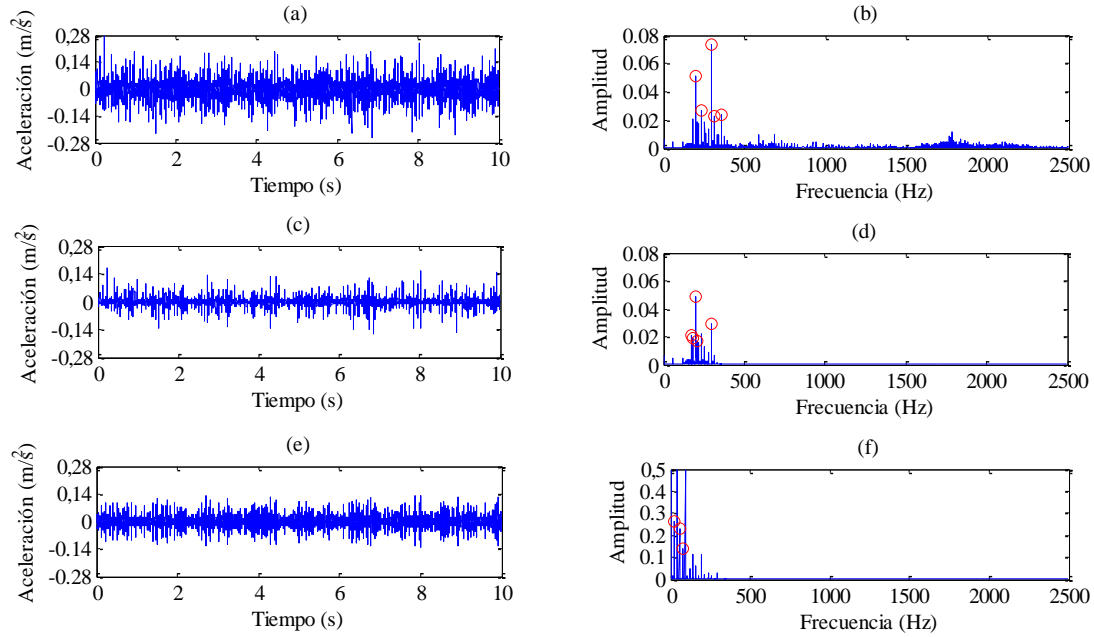


Figura 4-22. I201:

(a) señal en función del tiempo FI201, (b) espectro de frecuencias de FI201, (c) señal temporal WI201, (d) espectro de frecuencias de WI201, (e) señal temporal HI201, (f) espectro de frecuencias de HI201.

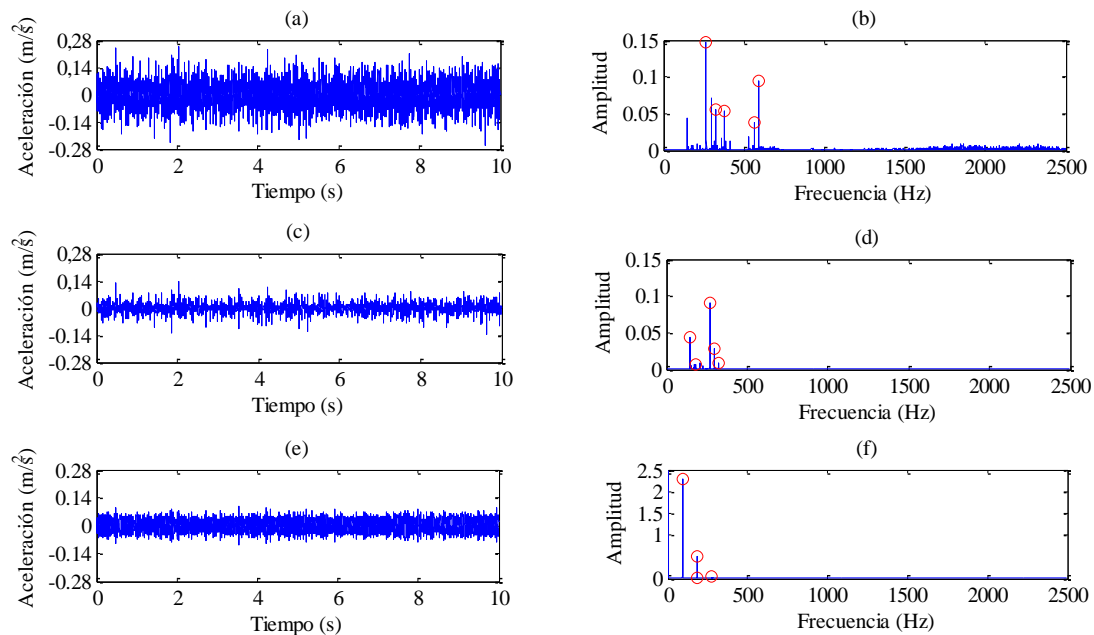


Figura 4-23. E301:

(a) señal en función del tiempo FE301, (b) espectro de frecuencias de FE301, (c) señal temporal WE301, (d) espectro de frecuencias de WE301, (e) señal temporal filtrada HE301, (f) espectro de frecuencias HE301.

En las cuatro figuras anteriores, 4-20, 4-21, 4-22 y 4-23 se verifica que la señal en función del tiempo sin filtrar es la original, obtenida directamente de la toma de la señal.



En la señal temporal filtrada con la Transformada Wavelet se puede apreciar su similitud con la señal temporal sin filtrar, las dos son semejantes en la forma pero disminuye la aceleración en la señal filtrada con la TW. En referencia a sus respectivos espectros de frecuencia cabe destacar que el filtrado Wavelet se produce en torno a la amplitud y a las elevadas frecuencias.

El filtrado con la Transformada Hilbert-Huang no guarda una relación concreta con los otros dos métodos.

4.5. Relación de las frecuencias obtenidas respecto a las teóricas para cada condición y velocidad

En el apartado 4.5 se muestran los espectros de frecuencia ampliados (en las figuras desde la 4-24 hasta la 4-35) para detallar las principales frecuencias características de los diferentes rodamientos; se especificarán desde la tabla 4-9 hasta la 4-31 tanto las frecuencias de los distintos defectos, la de la red eléctrica (50 Hz), la velocidad de giro como las combinaciones entre éstas y sus múltiplos.

En este caso se van a analizar doce de las señales tomadas que han sido destinadas al estudio por los cuatro tipos de rodamiento a tres velocidades de rotación.

Como ya se ha mencionado en el apartado 4.4 existe una gran similitud entre el procesamiento directo mediante la Transformada Rápida de Fourier y el filtrado con la Transformada Wavelet Estacionaria más el procesamiento de la TRF. Esto va a condicionar el estudio como se puede comprobar en las figuras 4-24, 4-25 y 4-26 con las señales del rodamiento normal donde sus espectros de frecuencia nos van a dar las mismas frecuencias características. Por ello con el resto de rodamientos (con defecto) se van a obviar las señales procesadas directamente con la TRF sin ningún tipo de filtrado anterior. En consecuencia, la comparativa prácticamente va a ser entre filtros TWE y THH.

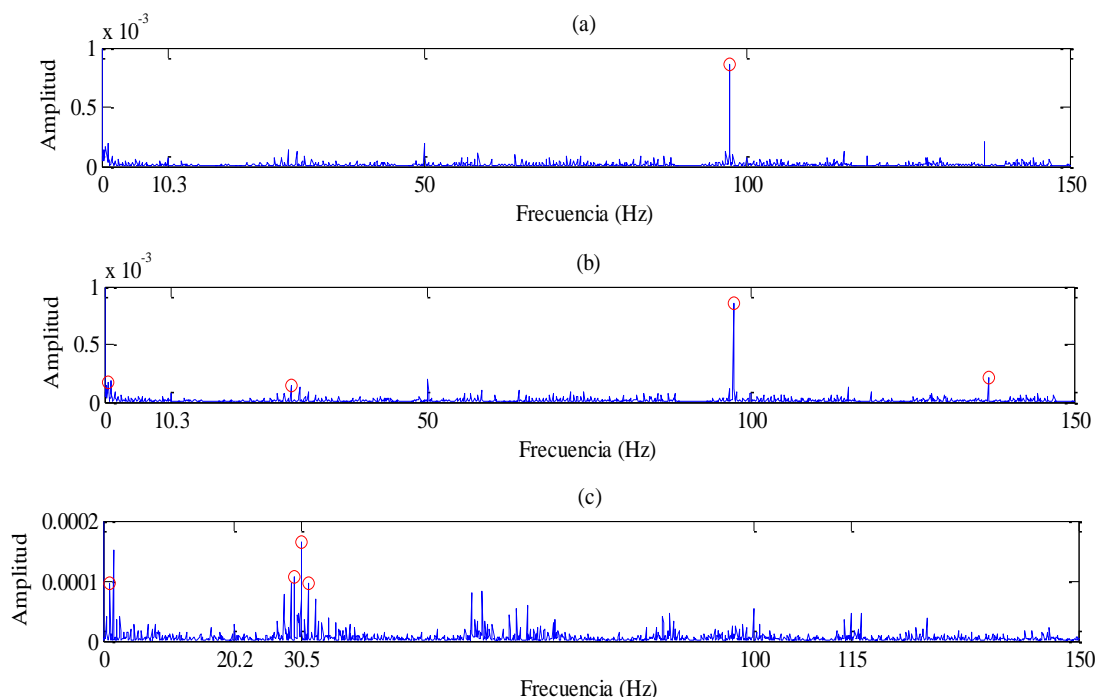


Figura 4-24. Espectros de frecuencias del rodamiento sin defecto a 10 Hz, 50000 muestras (N101):

(a) TRF de la señal sin filtrar, (b) TRF de la señal filtrada mediante la Transformada Wavelet Estacionaria, (c) TRF de la señal filtrada mediante la Transformada Hilbert-Huang.

En las gráficas a y b de la figura 4-24 se puede apreciar exactamente la frecuencia de la red (50 Hz) y su segundo múltiplo (100 Hz). La velocidad de giro de 10 Hz se representa con la frecuencia de 10.3 Hz, por lo que se puede observar un error; los márgenes de error entre las frecuencias teóricas y las experimentales o prácticas se calcularán en el apartado 4.7. Las frecuencias máximas señaladas mediante un círculo no expresan ningún dato significativo para el estudio.

Tabla 4-9. Análisis de frecuencias de FN101 y WN101.

Frecuencia [Hz]	Causa
10.3	Frecuencia de giro (10 Hz)
50	Frecuencia de la red (50 Hz)
100	2 * Frecuencia de la red (50) = 100 Hz

En la gráfica c de la figura 4-24 la frecuencia de mayor amplitud es la de 30.5 Hz que corresponde con el triple de la velocidad del giro (10 Hz), el caso es que también se aprecia su segundo múltiplo en la frecuencia de 20.2 Hz, pero sin embargo no se observa la propia frecuencia de giro. Lo mismo sucede con el doble de la frecuencia de la red (50 Hz); es decir, 100 Hz.

Tabla 4-10. Análisis de frecuencias de HN101.

Frecuencia [Hz]	Causa
20.2	$2 * \text{Frecuencia de giro (10)} = 20 \text{ Hz}$
30.5	$3 * \text{Frecuencia de giro (10)} = 30 \text{ Hz}$
100	$2 * \text{Frecuencia de la red (50)} = 100 \text{ Hz}$
115	$2 * \text{Frecuencia de la red (50)} + 4 * \text{frecuencia de defecto en la jaula (3.81)} = 115.24 \text{ Hz}$

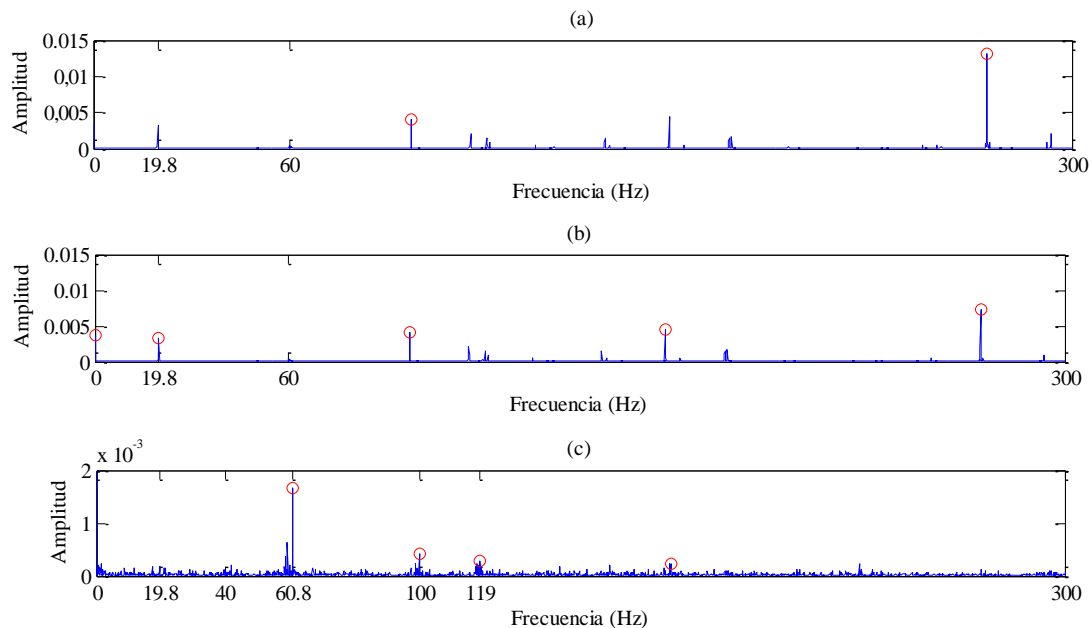


Figura 4-25. Espectros de frecuencias de N201:

(a) TRF de la señal sin filtrar, (b) TRF de la señal filtrada mediante la Transformada Wavelet, (c) TRF de la señal filtrada mediante la Transformada Hilbert-Huang.

En las gráficas a y b de la figura 4-25 se distingue con facilidad la frecuencia de 19.8 Hz (la propia frecuencia de giro (20 Hz)) y también de una manera más indirecta la frecuencia de 60 Hz, cuya explicación se encuentra en la tabla 4-11.

Tabla 4-11. Análisis de frecuencias de FN201 y WN201.

Frecuencia [Hz]	Causa
19.8	Frecuencia de giro (20 Hz)
60	$\text{Frecuencia de la red (50)} + \frac{1}{2} * \text{frecuencia de giro (20)} = 60 \text{ Hz}$

En la gráfica c de la figura 4-25 la frecuencia más amplia es 60.8 Hz, correspondiente al triple de la frecuencia de giro (20 Hz); pero en referencia a esta frecuencia están presentes esta misma y varios de sus múltiplos, analizados en la tabla 4-12.



Tabla 4-12. Análisis de frecuencias de HN201.

Frecuencia [Hz]	Causa
19.8	Frecuencia de giro (20 Hz)
40	2 * Frecuencia de giro (20) = 40 Hz
60.8	3 * Frecuencia de giro (20) = 60 Hz
100	5 * Frecuencia de giro (20) = 100 Hz
119	6 * Frecuencia de giro (20) = 120 HZ

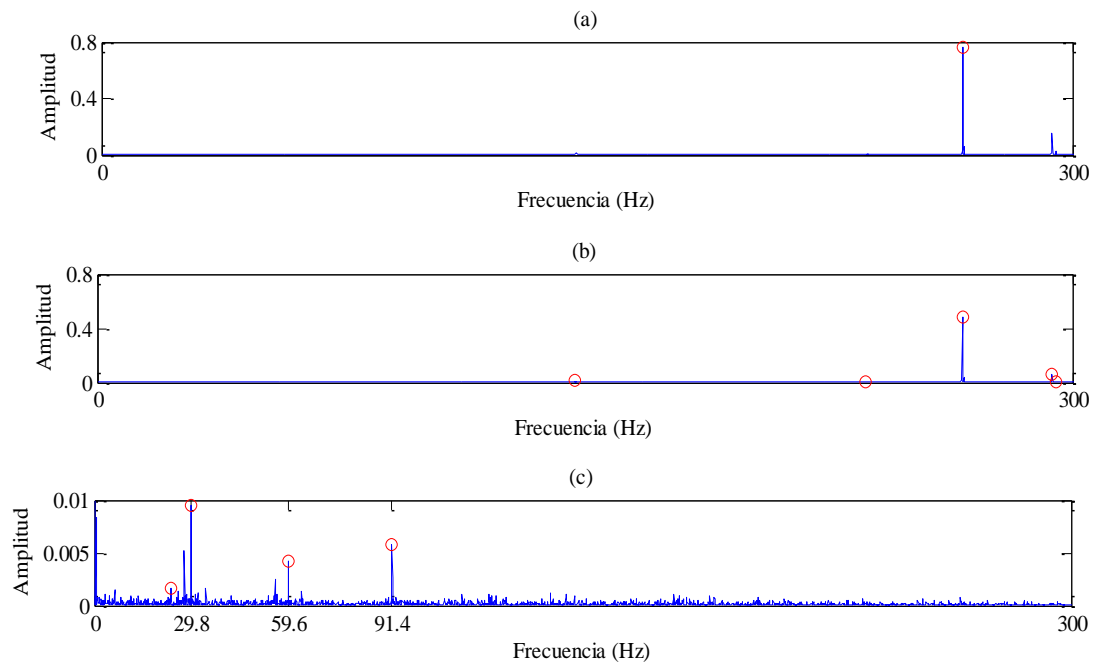


Figura 4-26. Espectros de frecuencia de N301:
(a) FN301, (b) WN301, (c) HN301.

En cuanto a la figura 4-26, no se encuentra ninguna frecuencia relevante del rodamiento sin defecto a 30 Hz con la Transformada Rápida de Fourier ni con la Transformada Wavelet Estacionaria. En cambio la frecuencia más llamativa con la Transformada Hilbert-Huang es la de 29.8 Hz, representando la propia velocidad de giro (30 Hz) y cabe destacar la importancia de su segundo y tercer múltiplo, 59.6 y 91.4 Hz respectivamente.

Tabla 4-13. Análisis de frecuencias de HN301.

Frecuencia [Hz]	Causa
29.8	Frecuencia de giro (30 Hz)
59.6	2 * Frecuencia de giro (30) = 60 Hz
91.4	3 * Frecuencia de giro (30) = 90 Hz

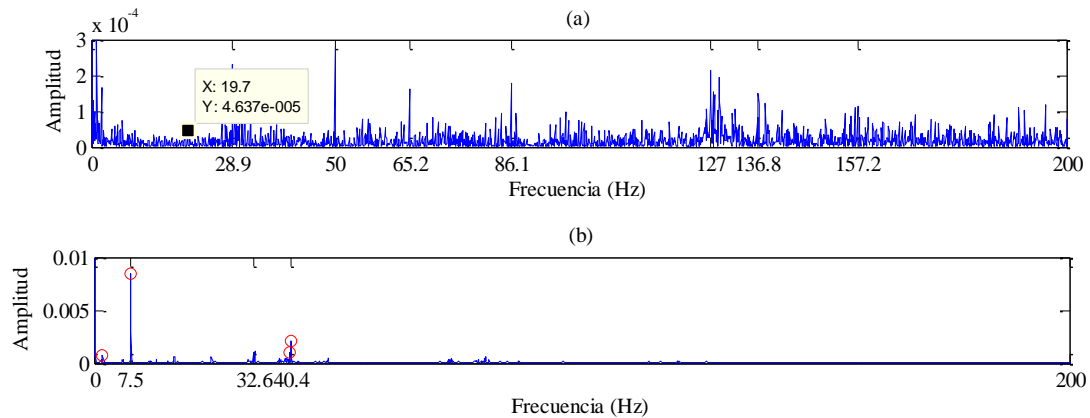


Figura 4-27. Espectros de frecuencia de B101:
(a) WB101, (b) HB101.

En la gráfica a de la figura 4-27 se puede apreciar a simple vista mucho ruido y frecuencias no muy reconocibles, pero también se puede distinguir con gran facilidad la frecuencia de la red (50 Hz) debido a su amplitud. El resto de frecuencias características se van a analizar en la tabla 4-14.

Tabla 4-14. Análisis de frecuencias de FB101 y WB101.

Frecuencia [Hz] (amplitud)	Causa
19.7 (4.637e-005)	Frecuencia del defecto (19.9106433 Hz)
28.9 (0.0002314)	Frecuencia del defecto (19.9106433) + frecuencia de giro (10) = 29.9106433 Hz
50 (0.0002797)	Frecuencia de la red (50 Hz)
59.3 (5.256e-005)	3 * Frecuencia del defecto (19.9106433) = 59.7319299 Hz
65.2 (0.0001631)	Frecuencia del defecto (19.9106433) + frecuencia de la red (50) – ½ * frecuencia de giro (10) = 64.9106433 Hz
86.1 (0.0001792)	2 * Frecuencia de la red (50) – frecuencia de giro (10) – frecuencia de defecto en la jaula (3.81) = 86.19 Hz
127 (0.0002156)	6 * Frecuencia del defecto (19.9106433) + 2 * frecuencia de defecto en la jaula (3.81) = 127.0838598 Hz
136.8 (0.0001523)	3 * Frecuencia de la red (50) – frecuencia de giro (10) – frecuencia de defecto en la jaula (3.81) = 136.19 Hz
157.2 (0.0001126)	8 * Frecuencia del defecto (19.9106433) = 159.2851464 Hz

En la gráfica b de la figura 4-27 la mayor frecuencia es el segundo múltiplo (7.62 Hz) de la frecuencia de defecto en la jaula (3.81 Hz) y a ésta le sigue también el segundo múltiplo (39.8212866 Hz) de la frecuencia del propio defecto (19.9106433 Hz). A partir de estas frecuencias se obtienen las demás.



Tabla 4-15. Análisis de frecuencias de HB101.

Frecuencia [Hz] (amplitud)	Causa
7.5 (0.008401)	$2 * \text{Frecuencia de defecto en la jaula } (3.81) = 7.62 \text{ Hz}$
32.6 (0.001067)	$2 * \text{Frecuencia del defecto } (19.9106433) - 2 * \text{frecuencia de defecto en la jaula } (3.81) = 32.2012866 \text{ Hz}$
40.4 (0.002081)	$2 * \text{Frecuencia del defecto } (19.9106433) = 39.8212866 \text{ Hz}$

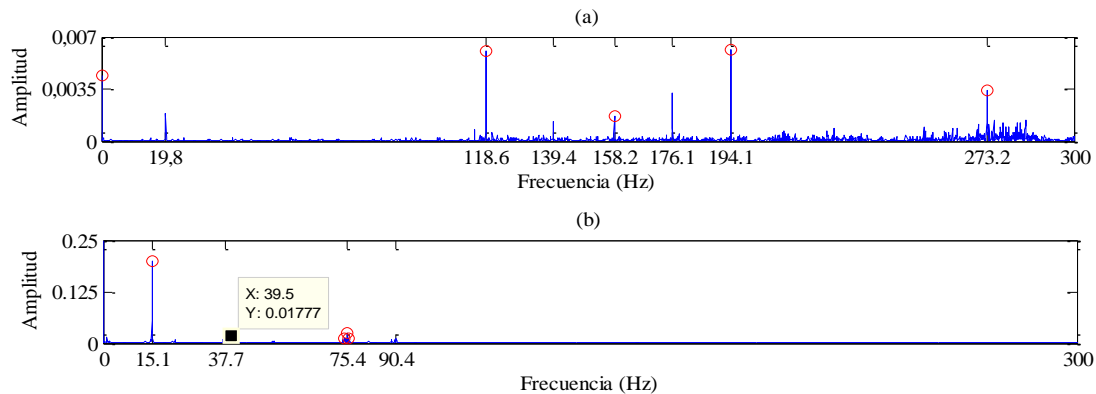


Figura 4-28. Espectros de frecuencias de B201:
(a) WB201, (b) HB201.

Claramente los máximos representan frecuencias importantes en la gráfica a de la figura 4-28, como son algunos de los múltiplos de la frecuencia del defecto en bola a 20 Hz (el tercero, 118.6 Hz, y el cuarto múltiplo, 158.2 Hz) y la frecuencia de giro (20 Hz). A partir de estas frecuencias y también del segundo múltiplo de la frecuencia de defecto en la jaula (7.63 Hz) se pueden conseguir casi el resto de ellas.

Tabla 4-16. Análisis de frecuencias de WB201.

Frecuencia [Hz]	Causa
19.8	Frecuencia de giro (20 Hz)
118.6	$3 * \text{Frecuencia del defecto } (39.821285) = 119.463855 \text{ Hz}$
139.4	$3 * \text{Frecuencia del defecto } (39.821285) + \text{frecuencia de giro } (20) = 139.463855 \text{ Hz}$
158.2	$4 * \text{Frecuencia del defecto } (39.821285) = 159.28514 \text{ Hz}$
176.1	$4 * \text{Frecuencia del defecto } (39.821285) + 2 * \text{frecuencia de defecto en la jaula } (7.63) = 174.5451412 \text{ Hz}$
194.1	$4 * \text{Frecuencia del defecto } (39.821285) + \text{frecuencia de giro } (20) + 2 * \text{frecuencia de defecto en la jaula } (7.63) = 194.5451412 \text{ Hz}$
273.2	$6 * \text{Frecuencia del defecto } (39.821285) + \text{frecuencia de giro } (20) + 2 * \text{frecuencia de defecto en la jaula } (7.63) = 274.18771 \text{ Hz}$



La principal frecuencia de la gráfica b de la figura 4-28 es el segundo múltiplo (15.26 Hz) de la frecuencia de defecto en la jaula (7.63 Hz), aunque también es importante: la frecuencia del propio defecto (39.821285 Hz), las combinaciones con estas dos y la frecuencia de giro (20 Hz).

Tabla 4-17. Análisis de frecuencias de HB201.

Frecuencia [Hz]	Causa
15.1	$2 * \text{Frecuencia de defecto en la jaula (7.63)} = 15.26 \text{ Hz}$
37.7	$5 * \text{Frecuencia de defecto en la jaula (7.63)} = 38.15 \text{ Hz}$
75.4	$\text{Frecuencia del defecto (39.821285)} + \text{frecuencia de giro (20)} + 2 * \text{frecuencia de defecto en la jaula (7.63)} = 75.081285 \text{ Hz}$
90.4	$\text{Frecuencia del defecto (39.821285)} + \text{frecuencia de giro (20)} + 4 * \text{frecuencia de defecto en la jaula (7.63)} = 90.341285 \text{ Hz}$

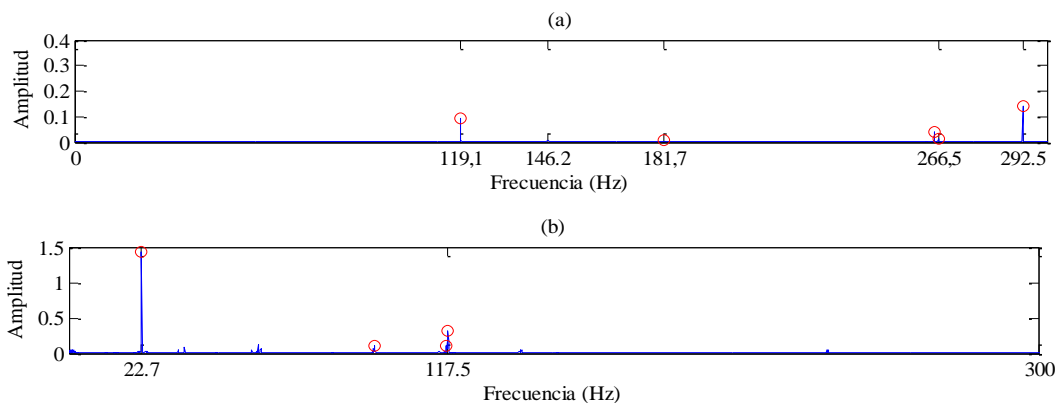


Figura 4-29. Espectros de frecuencias de B301:
(a) WB301, (b) HB301.

Se puede clasificar en la gráfica a de la figura 4-29 el rodamiento con defecto en bola con bastante facilidad, ya que los dos primeros máximos que nos da la función integrada en el filtro unidimensional de la Transformada Wavelet Estacionaria más la Transformada Rápida de Fourier corresponden respectivamente con el segundo (119.4638596 Hz) y tercer múltiplo (179.1957894 Hz) de la frecuencia del defecto (59.7319298 Hz).

Tabla 4-18. Análisis de frecuencias de WB301.

Frecuencia [Hz]	Causa
119.1	$2 * \text{Frecuencia del defecto (59.7319298)} = 119.4638596 \text{ Hz}$
146.2	$\text{Frecuencia de defecto en pista interior (148.441791 Hz)}$
181.7	$3 * \text{Frecuencia del defecto (59.7319298)} = 179.1957894 \text{ Hz}$
266.5	$2 * \text{Frecuencia del defecto (59.7319298)} + \text{frecuencia de defecto en pista interior (148.441791)} = 267.9056506 \text{ Hz}$



En la gráfica b, figura 4-29, la frecuencia más llamativa es el segundo múltiplo (22.88 Hz) de la frecuencia de defecto en la jaula (11.44 Hz) y otra frecuencia significativa es 117.5 Hz que puede confundirse con el segundo múltiplo (119.4638596 Hz) de la frecuencia del defecto en bola (59.7319298 Hz), pero ésta corresponde a una combinación de la frecuencia del defecto con la de la jaula.

Tabla 4-19. Análisis de frecuencias de HB301.

Frecuencia [Hz]	Causa
22.7	$2 * \text{Frecuencia de defecto en la jaula (11.44)} = 22.88 \text{ Hz}$
117.5	$\text{Frecuencia del defecto (59.7319298)} + 5 * \text{frecuencia de defecto en la jaula (11.44)} = 116.9319298 \text{ Hz}$

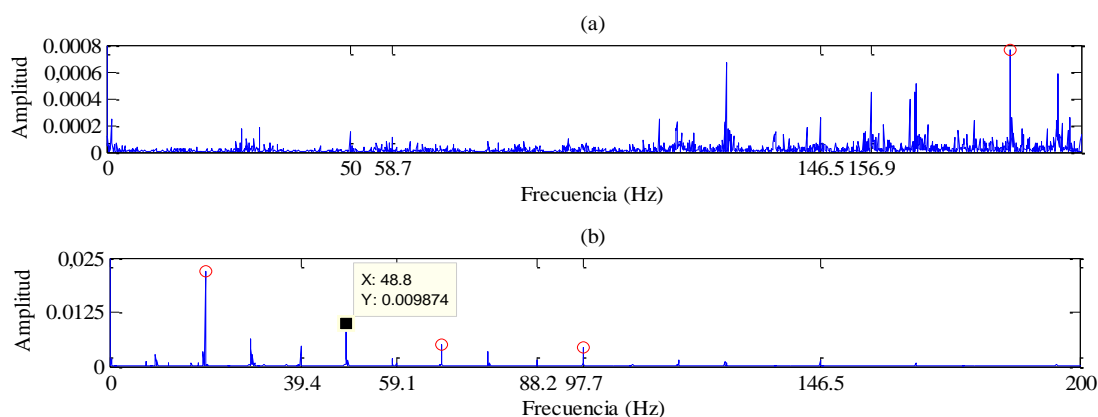


Figura 4-30. Espectros de frecuencias de II01:

(a) WII01, (b) HII01.

Una frecuencia más o menos amplia que se puede apreciar directamente (en la gráfica a de la figura 4-30) es la de la red (50 Hz) y las demás son combinaciones o múltiplos de la frecuencia del defecto (49.480597 Hz) con la de giro (10 Hz).

Tabla 4-20. Análisis de frecuencias de WII01.

Frecuencia [Hz]	Causa
50	Frecuencia de la red (50 Hz)
58.7	$\text{Frecuencia del defecto (49.480597)} + \text{frecuencia de giro (10)} = 59.480597 \text{ Hz}$
146.5	$3 * \text{Frecuencia del defecto (49.480597)} = 148.441791 \text{ Hz}$
156.9	$3 * \text{Frecuencia del defecto (49.480597)} + \text{frecuencia de giro (10)} = 158.441791 \text{ Hz}$

En cuanto a la gráfica b de la figura 4-30 la frecuencia más amplia corresponde con la de defecto en bola (19.9106433 Hz), que tiene que ver con la frecuencia del defecto (49.480597 Hz), también muy distinguible, ya que en resumidas cuentas la bola toca con la pista interior. Con estas frecuencias y la de giro (10 Hz) se pueden sacar el resto de una manera bastante sencilla.



Tabla 4-21. Análisis de frecuencias de HI101.

Frecuencia [Hz]	Causa
9.5	Frecuencia de giro (10 Hz)
39.4	Frecuencia del defecto (49.480597) - frecuencia de giro (10) = 39.480597 Hz
59.1	Frecuencia del defecto (49.480597) + frecuencia de giro (10) = 59.480597 Hz
88.2	2 * Frecuencia del defecto (49.480597) – frecuencia de giro (10) = 88.961194 Hz
97.7	2 * Frecuencia del defecto (49.480597) = 98.961194
146.5	3 * Frecuencia del defecto (49.480597) = 148.441791 Hz

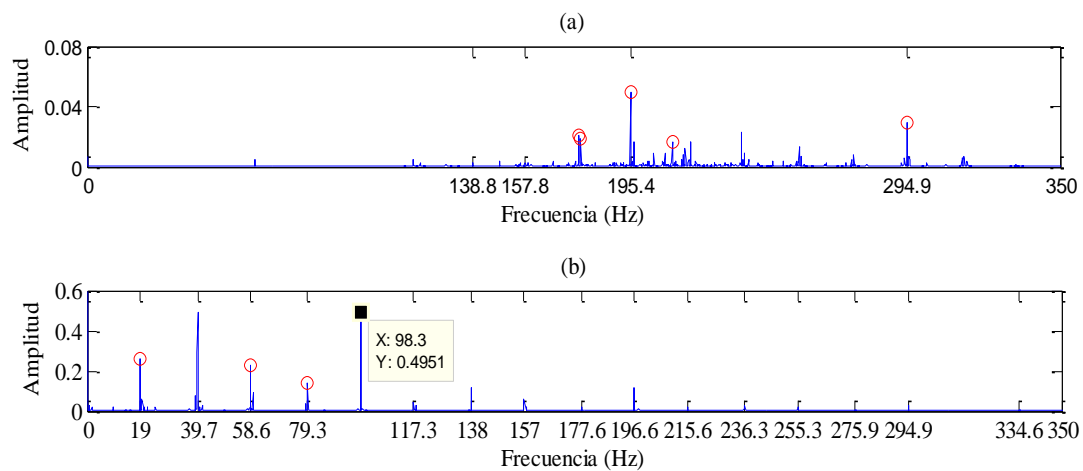


Figura 4-31. Espectros de frecuencias de I201:

(a) WI201, (b) HI201.

Para comentar la gráfica a de la figura 4-31 es necesario dirigirse al apartado 4.2 donde se encuentra la explicación realizada sobre dos de las frecuencias máximas y que queda resumida en la tabla 4-22.

Tabla 4-22. Análisis de frecuencias de WI201.

Frecuencia [Hz]	Causa
195.4	2 * Frecuencia del defecto (98.961194) = 197.922388 Hz
294.9	3 * Frecuencia del defecto (98.961194) = 296.883582 Hz

En la gráfica b (de la figura 4-31) la frecuencia de mayor amplitud corresponde con la frecuencia del defecto (98.961194 Hz) y aunque el rodamiento sea con defecto en pista interior también contribuye el defecto en bola (39.821285 Hz), casi con la misma amplitud, porque la bola contacta con la pista interior. Con estas frecuencias y la de giro (20 Hz) se pueden sacar el resto de una manera bastante sencilla.

Tabla 4-23. Análisis de frecuencias de HI201.

Frecuencia [Hz]	Causa
19	Frecuencia de giro (20 Hz)
58.6	Frecuencia del defecto (98.961194) – 2 * frecuencia de giro (20) = 58.961194 Hz
79.3	Frecuencia del defecto (98.961194) - frecuencia de giro (20) = 78.961194 Hz
98.3	Frecuencia del defecto (98.961194 Hz)
177.6	2 * Frecuencia del defecto (98.961194) - frecuencia de giro (20) = 177.922388 Hz
196.6	2 * Frecuencia del defecto (98.961194) = 197.922388 Hz
275.9	3 * Frecuencia del defecto (98.961194) – frecuencia de giro (20) = 276.883582 Hz
294.9	3 * Frecuencia del defecto (98.961194) = 296.883582 Hz

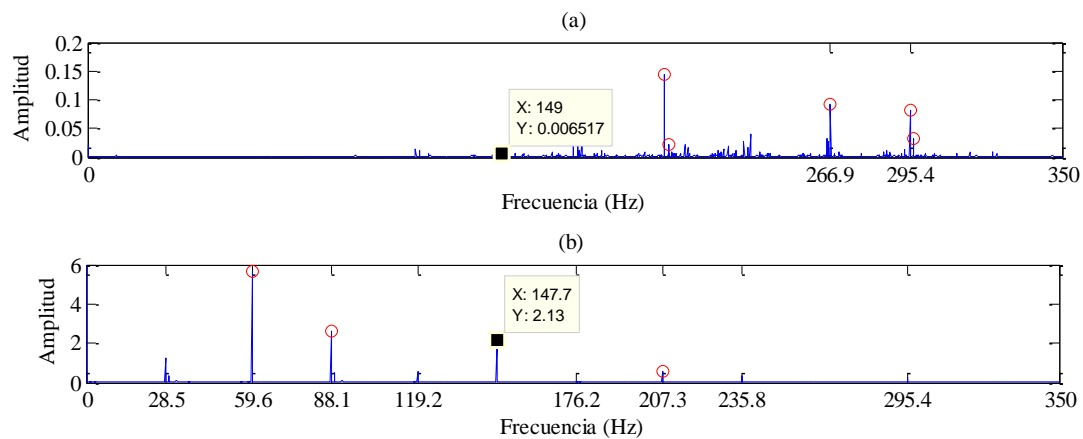


Figura 4-32. Espectros de frecuencias de I301:
(a) WI301, (b) HI301.

Es de gran interés para este estudio explicar la figura 4-32 de la gráfica b debido a que representa un buen filtrado porque las frecuencias más representativas significan la frecuencia del defecto (148.441791 Hz), la de giro (30 Hz) y el resto son combinaciones de ambas.

Tabla 4-24. Análisis de frecuencias de WI301.

Frecuencia [Hz]	Causa
149	Frecuencia del defecto (148.441791 Hz)
266.9	2 * Frecuencia de defecto (148.441791) – frecuencia de giro (30) = 266.883582 Hz
295.4	2 * Frecuencia del defecto (148.441791) = 296.883582 Hz

Tabla 4-25. Análisis de frecuencias de HI301.

Frecuencia [Hz]	Causa
28.5	Frecuencia del defecto (148.441791) – 4 * frecuencia de giro (30) = 28.441791 Hz
59.6	2 * Frecuencia de giro (30) = 60 Hz
88.1	Frecuencia del defecto (148.441791) – 2 * frecuencia de giro (30) = 88.441791 Hz
119.2	4 * Frecuencia de giro (30) = 120 Hz
147.7	Frecuencia del defecto (148.441791 Hz)
176.2	2 * Frecuencia del defecto (148.441791) – 4 * frecuencia de giro (30) = 176.883582 Hz
207.3	Frecuencia del defecto (148.441791) + 2 * frecuencia de giro (30) = 208.441791 Hz
235.8	2 * Frecuencia del defecto (148.441791) – 2 * frecuencia de giro (30) = 236.883582 Hz
295.4	2 * Frecuencia del defecto (148.441791) = 296.883582 Hz

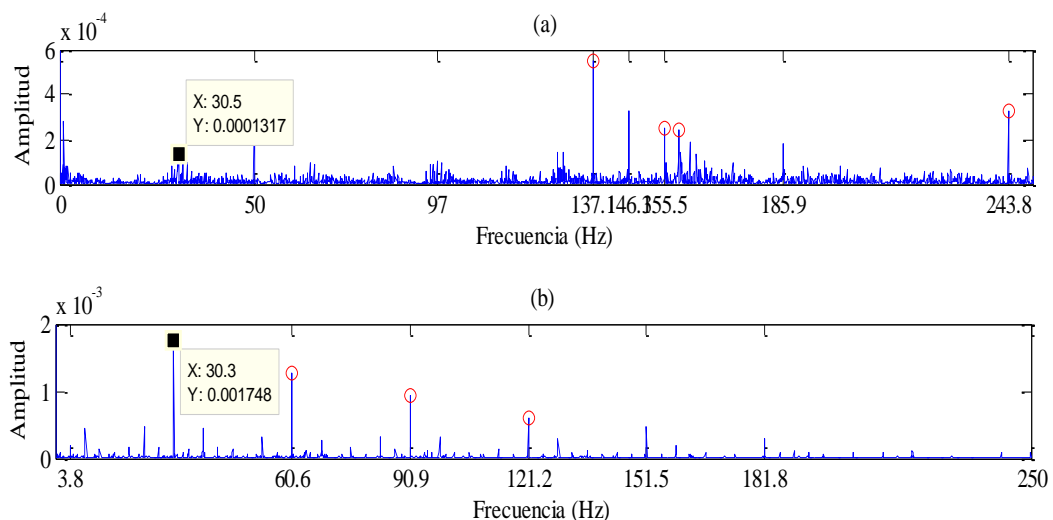


Figura 4-33. Espectros de frecuencias de E101:

(a) WE101, (b) HE101.

Dos de las frecuencias máximas de la gráfica a (figura 4-33) corresponden con el quinto (152.597015 Hz) y octavo múltiplo (244.155224 Hz) de la frecuencia del defecto. Pero también la frecuencia de la línea se puede observar bastante amplia (50 Hz).



Tabla 4-26. Análisis de frecuencias de WE101.

Frecuencia [Hz]	Causa
30.5	Frecuencia del defecto (30.519403 Hz)
50	Frecuencia de la red (50 Hz)
97	Frecuencia del defecto (30.519403) + frecuencia de la red (50) + frecuencia de giro (10) + 2 * frecuencia de defecto en la jaula (3.81) = 98.139403 Hz
137.1	2 * Frecuencia del defecto (30.519403) + frecuencia de la red (50) + 2 * frecuencia de giro (10) + 2 * frecuencia de defecto en la jaula (3.81) = 138.658806 Hz
146.3	5 * Frecuencia del defecto (30.519403) - 2 * frecuencia de defecto en la jaula (3.81) = 144.977015 Hz
155.5	5 * Frecuencia del defecto (30.519403) = 152.597015 Hz
185.9	6 * Frecuencia del defecto (30.519403) = 183.116418 Hz
243.8	8 * Frecuencia del defecto (30.519403) = 244.155224 Hz

En la gráfica b de la figura 4-33 el máximo que se puede apreciar corresponde a la frecuencia de defecto en pista externa a 10 Hz y va disminuyendo en sus respectivos múltiplos. Identifica perfectamente el defecto del rodamiento.

Tabla 4-27. Análisis de frecuencias de HE101.

Frecuencia [Hz]	Causa
3.8	Frecuencia de defecto en la jaula (3.81 Hz)
30.3	Frecuencia del defecto (30.519403) 8 * Frecuencia de defecto en la jaula (3.81) = 30.48 Hz
60.6	2 * Frecuencia del defecto (30.519403) = 61.038806 Hz
90.9	3 * Frecuencia del defecto (30.519403) = 91.558209 Hz
121.2	4 * Frecuencia del defecto (30.519403) = 122.077612 Hz
151.5	5 * Frecuencia del defecto (30.519403) = 152.597015 Hz
181.8	6 * Frecuencia del defecto (30.519403) = 183.116418 Hz

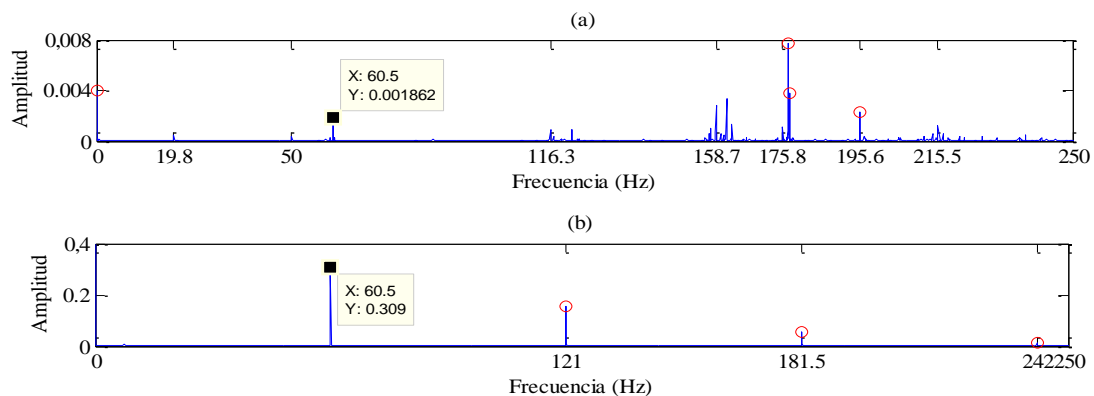


Figura 4-34. Espectros de frecuencias de E201:

(a) WE201, (b) HE201.



Nada más ver la gráfica a (figura 4-34) se identifica por la magnitud de sus frecuencias: la frecuencia de giro (19.8 Hz), la de la red (50 Hz), la del propio defecto (60.5 Hz) y la de su múltiplo más cercano (121.7 Hz).

Tabla 4-28. Análisis de frecuencias de WE201.

Frecuencia [Hz]	Causa
19.8	Frecuencia de giro (20 Hz)
50	Frecuencia de la red (50 Hz)
60.5	Frecuencia del defecto (61.038806 Hz)
116.3	2 * Frecuencia del defecto (61.038806) – frecuencia de defecto en la jaula (7.63) = 114.447612 Hz
121.7	2 * Frecuencia del defecto (61.038806) = 122.077612
158.7	2 * Frecuencia del defecto (61.038806) + frecuencia de la red (50) - frecuencia de giro (20) + frecuencia de defecto en la jaula (7.63) = 159.70612 Hz
175.8	2 * Frecuencia del defecto (61.038806) + frecuencia de la red (50) + ½ * frecuencia de defecto en la jaula (7.63) = 175.892612 Hz
195.6	2 * Frecuencia del defecto (61.038806) + frecuencia de la red (50) + frecuencia de giro (20) + ½ * frecuencia de defecto en la jaula (7.63) = 195.892612 Hz
215.5	2 * Frecuencia del defecto (61.038806) + frecuencia de la red (50) + frecuencia de giro (20) + 2 * frecuencia de defecto en la jaula (7.63) + frecuencia de defecto en la jaula (7.63) = 214.967612 Hz

Se puede decir que lo único que se puede apreciar en la gráfica b de la figura 4-34 es la frecuencia del propio defecto (61.038806 Hz) y sus respectivos múltiplos. Incluso se puede llegar a distinguir el quinto múltiplo.

Tabla 4-29. Análisis de frecuencias de HE201.

Frecuencia [Hz]	Causa
60.5	Frecuencia del defecto (61.038806 Hz)
121	2 * Frecuencia del defecto (61.038806) = 120.07612 Hz
181.5	3 * Frecuencia del defecto (61.038806) = 183.116418 Hz
242	4 * Frecuencia del defecto (61.038806) = 244.155224 Hz

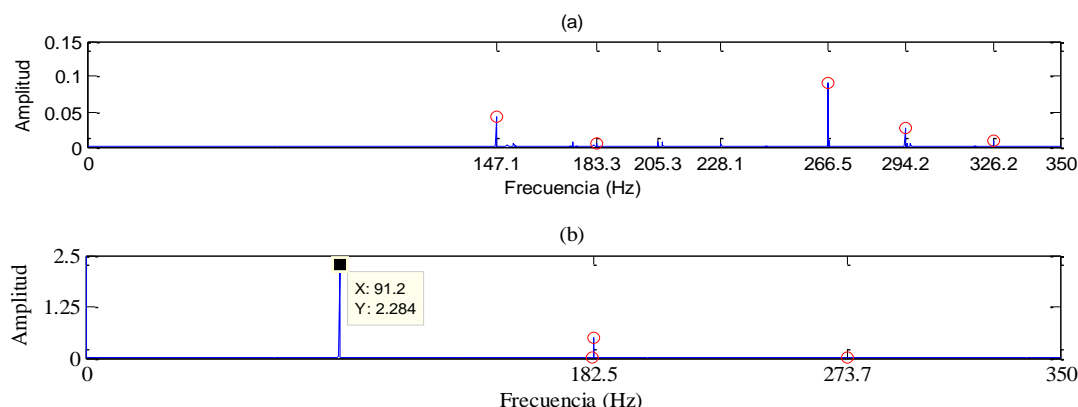


Figura 4-35. Espectros de frecuencias de E301:
(a) WE301, (b) HE301.

La única frecuencia observable en la gráfica a de la figura 4-35 a la que se encuentra significado fácilmente es la frecuencia del defecto en pista exterior a 30 Hz multiplicada por 2 (183.3 Hz), las demás han sido difícilmente conseguidas como se puede observar en la tabla 4-30.

Tabla 4-30. Análisis de frecuencias de WE301.

Frecuencia [Hz]	Causa
147.1	Frecuencia del defecto (91.5582509) + frecuencia de la red (50) + $\frac{1}{2}$ * frecuencia de defecto en la jaula (11.44) = 147.278209 Hz
183.3	2* Frecuencia del defecto (91.5582509) = 183.116418 Hz
205.3	2* Frecuencia del defecto (91.5582509) + 2 * frecuencia de defecto en la jaula (11.44) = 205.996418 Hz
228.1	2* Frecuencia del defecto (91.5582509) + 4 * frecuencia de defecto en la jaula (11.44) = 228.87618 Hz
266.5	2* Frecuencia del defecto (91.5582509) + frecuencia de la red (50) + 3 * frecuencia de defecto en la jaula (11.44) = 267.436418 Hz
294.2	3* Frecuencia del defecto (91.5582509) + frecuencia de giro (30) - frecuencia de defecto en la jaula (11.44) = 293.234627 Hz
326.2	3* Frecuencia del defecto (91.5582509) + frecuencia de giro (30) + 2 * frecuencia de defecto en la jaula (11.44) = 327.554627 Hz



Este filtrado a esta velocidad y con este tipo de defecto es exacto, como se puede observar en la gráfica b de la figura 4-35 la frecuencia más amplia corresponde con la del defecto y la segunda mayor con el segundo múltiplo de ésta y así sucesivamente.

Tabla 4-31. Análisis de frecuencias de HE301.

Frecuencia [Hz]	Causa
91.2	Frecuencia del defecto (91.558209 Hz)
182.5	2 * Frecuencia del defecto (91.558209) = 183.116418 Hz
237.7	3 * Frecuencia del defecto (91.558209) = 274.674627 Hz

4.6. Márgenes de error entre las frecuencias teóricas y las experimentales

En el apartado 4.6 se van a calcular los márgenes de error entre las frecuencias teóricas de los defectos y las experimentales, teniendo en cuenta que el error se calculará mediante la ecuación 4.1.

Este error se podría calcular para todas las frecuencias características pero como el objetivo de este proyecto es identificar los defectos en los rodamientos se va a priorizar calcular los errores anteriormente citados en las tablas 4-32 y 4-33.

$$Error [\%] = \frac{Frecuencia\ teórica - Frecuencia\ experimental}{Frecuencia\ teórica} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Tabla 4-32. Error entre las frecuencias teóricas y las experimentales de defecto mediante la TWE.

			Transformada Wavelet Estacionaria	
		Frecuencia teórica [Hz]	F. Experimental [Hz]	Error [%]
BPFO	10 Hz	30.519403	30.5	0.063575948
	20 Hz	61.038806	60.5	0.882726965
	30 Hz	91.558209	-	-
BPFI	10 Hz	49.480597	-	-
	20 Hz	98.961194	-	-
	30 Hz	148.441791	147.3	0.769184333
BSF	10 Hz	19.9106433	19.7	1.057943216
	20 Hz	39.8212865	-	-
	30 Hz	59.7319298	-	-



Tabla 4-33. Error entre las frecuencias teóricas y las experimentales de defecto mediante la THH.

			Transformada Hilbert-Huang	
		Frecuencia teórica [Hz]	F. Experimental [Hz]	Error [%]
BPFO	10 Hz	30.519403	30.3	0.718896762
	20 Hz	61.038806	60.5	0.882726965
	30 Hz	91.558209	91.2	0.391236355
BPFI	10 Hz	49.480597	48.8	1.375482596
	20 Hz	98.961194	98.3	0.668134622
	30 Hz	148.441791	147.7	0.499718438
BSF	10 Hz	19.9106433	-	-
	20 Hz	39.8212865	39.5	0.806820995
	30 Hz	59.7319298	-	-

Sólo se mostrarán las frecuencias propias de cada defecto; es decir, que si los defectos se manifiestan en alguno de sus múltiplos o en combinación con otras frecuencias no se calcularán sus errores respecto a las frecuencias teóricas. Esto se debe a que lo perfecto sería que para identificar un defecto apareciese directamente su frecuencia de defecto. Entonces habrá casillas en las tablas 4-32 y 4-33 sin rellenar.

De este apartado se puede demostrar que en cuanto a la existencia de las propias frecuencias de defecto y a los menores márgenes de error entre las teóricas y las experimentales existe un resultado gratamente satisfactorio en el filtrado mediante la Transformada Hilbert-Huang. Esta información se ampliará en el capítulo 5.

4.7. Diferencias entre los rodamientos con defecto y el normal

Las diferentes señales temporales (sin filtrar, filtrada con la TW y con la THH) del rodamiento normal o sin defecto con el resto de rodamientos (rodamiento con defecto en bola, en pista interior y exterior) se van a comparar a las tres velocidades (10, 20 y 30 Hz). Para ello se van a presentar tres figuras representativas de las nueve utilizadas para el estudio, una para cada tipo de defecto del rodamiento.

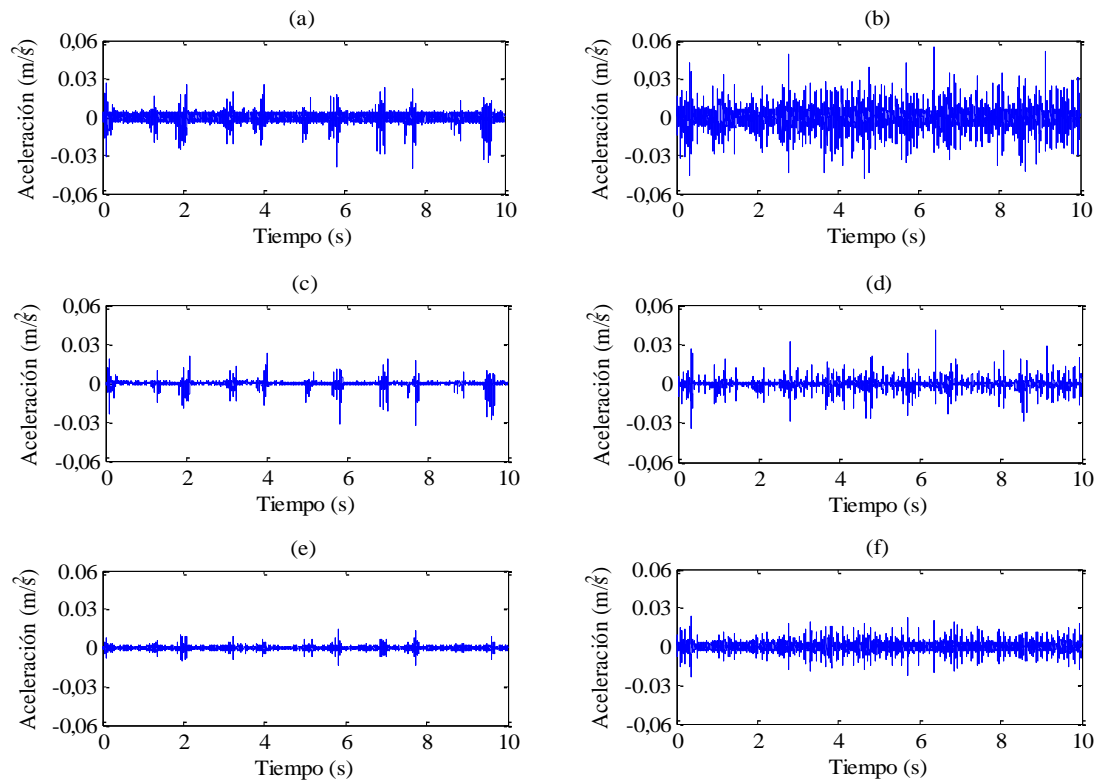


Figura 4-36. Símil entre rodamiento sin defecto [(a), (c) y (e)] y rodamiento con defecto en bola [(b), (d) y (e)] a 10 Hz, 50000 muestras:

(a) y (b) señales en función del tiempo sin filtrar, (c) y (d) señales temporales filtradas mediante la Transformada Wavelet Estacionaria, (e) y (f) señales temporales filtradas mediante la Transformada Hilbert-Huang.

En la figura 4-36 se puede ver que las señales temporales del rodamiento sin defecto y del rodamiento con defecto en bola son similares en cuanto a la amplitud de la aceleración.

Esto se aprecia en que las señales temporales del rodamiento sin defecto no son homogéneas sino que hay picos que se pueden distinguir con bastante facilidad, lo que no ocurrirá con los siguientes rodamientos defectuosos.

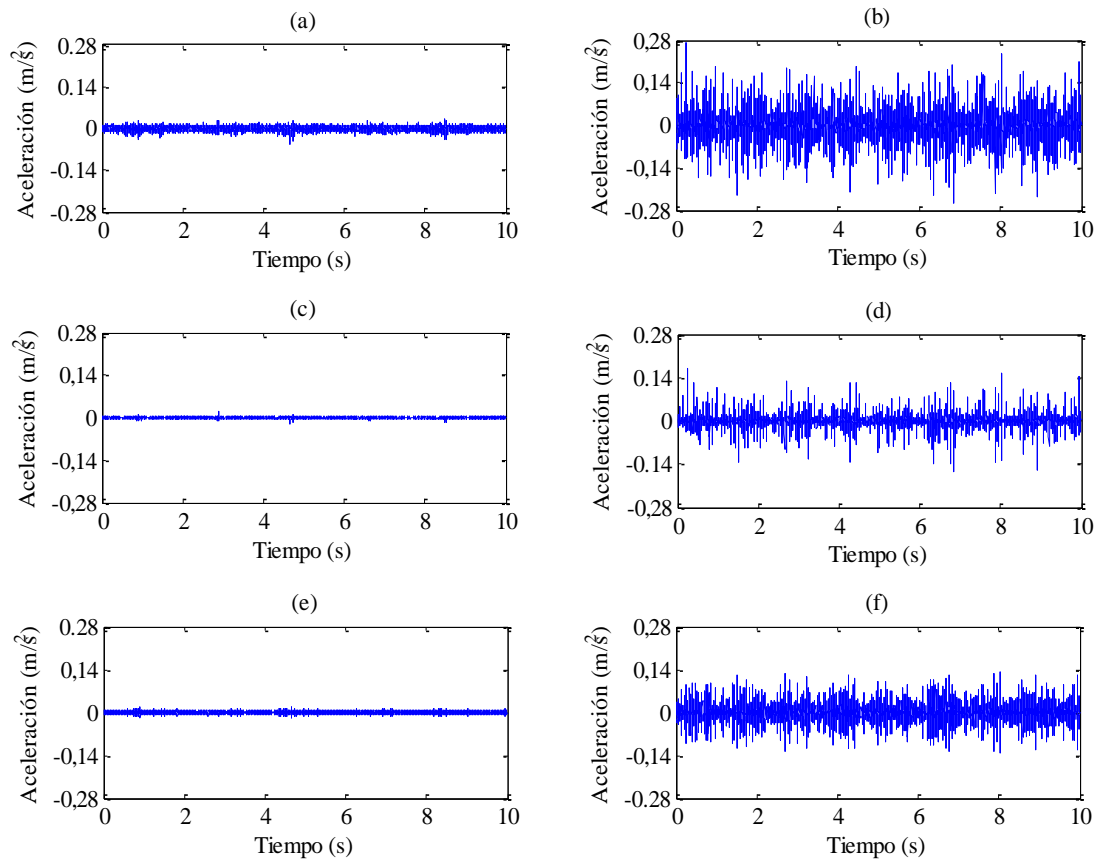


Figura 4-37. *Símil entre rodamiento sin defecto [(a), (c) y (e)] y rodamiento con defecto en pista interior [(b), (d) y (e)] a 20 Hz, 50000 muestras:*
 (a) y (b) señales en función del tiempo sin filtrar, (c) y (d) señales temporales filtradas mediante la TWE, (e) y (f) señales temporales filtradas mediante la THH.

Lo que más llama la atención de esta figura 4-37 es la gran aceleración de las señales temporales del rodamiento con defecto en pista interior, lo que repercute en las señales del rodamiento sin defecto que al poseer la misma escala parece que es una señal bastante homogénea sin ningún pico aparentemente apreciable.

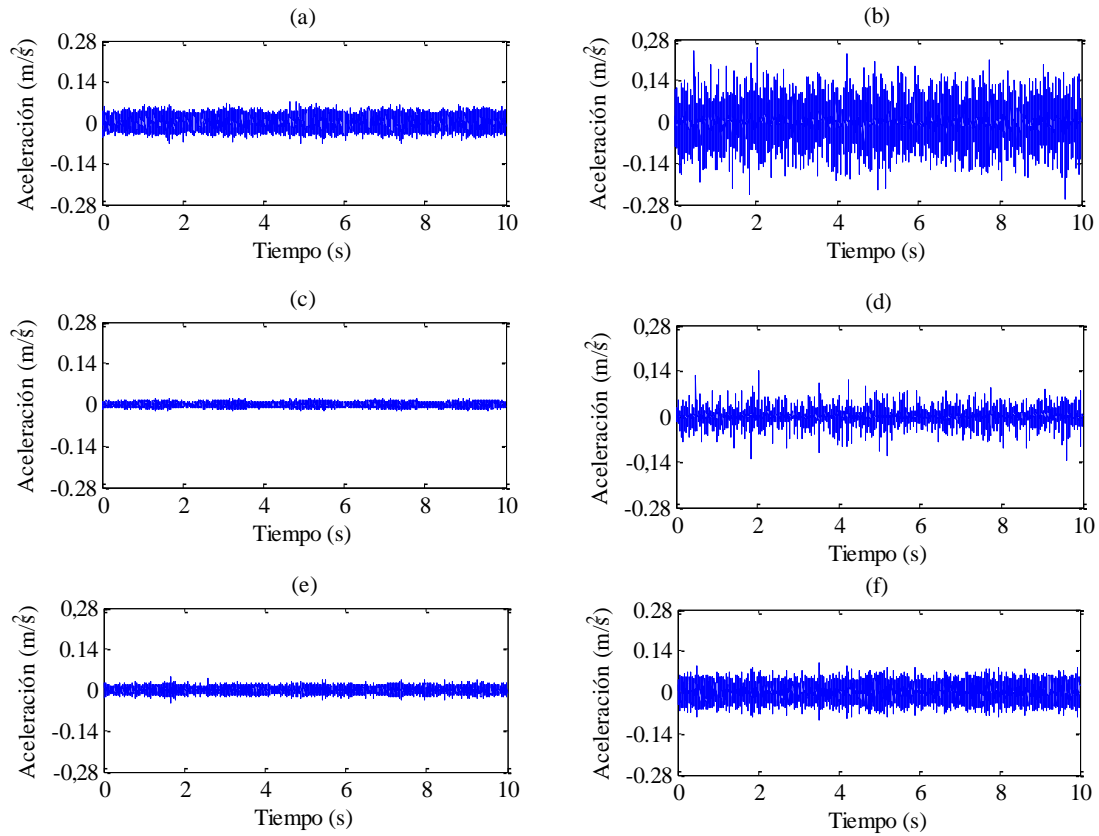


Figura 4-38. Símil entre las señales temporales del rodamiento sin defecto y el rodamiento con defecto en pista exterior:

(a) FN301, (b) FE301, (c) WN301, (d) WB301, (e) HN301 y (f) HB301.

En esta figura 4-38 existe una situación parecida a la anterior porque las señales del rodamiento con defecto en pista exterior tienen gran aceleración y las señales del rodamiento sin defecto al tener muy poca aceleración, guardando la misma escala entre ambas para realizar la comparativa, aparecen como señales homogéneas.



5. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

5.1. Conclusiones

En primer lugar se van a recordar los objetivos propuestos y que fueron enumerados en la Introducción de este proyecto. El principal objetivo ha sido desarrollar el mejor filtrado para la detección de fallos en rodamientos industriales a partir de su señal de vibración. Todos los programas necesarios para esta diagnosis han sido realizados, como se anunció en la Introducción, mediante programación en Matlab.

Con este proyecto se ha querido realizar un estudio de señales de vibración obtenidas de una máquina en la que se montaron rodamientos con diferentes tipos de defecto. Tras la obtención de los espectros en frecuencia de las señales por diferentes métodos, se pasó a aplicar la Transformada Rápida de Fourier, para tratar de identificar automáticamente si el rodamiento presentaba algún defecto y dónde estaba localizado.

Este método es muy utilizado en la industria para determinar cuando un rodamiento presenta algún tipo de defecto.

A continuación se analizan los resultados obtenidos:

- Al aumentar la velocidad de giro del eje aumenta la amplitud de las vibraciones obtenidas, así como el ruido presente en la señal, por lo tanto es posible distinguir a simple vista y con sólo la representación temporal un rodamiento en perfecto estado de uno que no lo está.
- La Transformada Rápida de Fourier no aporta información útil de las señales, ya que hay mucho ruido y las frecuencias de defecto y de giro del eje quedan ocultas por éste en el espectro de frecuencias.
- La Transformada Wavelet Estacionaria es un filtrado que no ha sido útil para este estudio porque es un tipo de filtro que sobre todo actúa en las altas frecuencias, por eso a efectos de cálculo en bajas frecuencias se ha considerado como la Transformada Rápida de Fourier.
- La Transformada de Hilbert-Huang es un buen método de filtrado, aplicando posteriormente la Transformada Rápida de Fourier se obtienen los resultados esperados.
- Si se aplican técnicas de filtrado, como la Transformada de Hilbert-Huang, antes de aplicar la Transformada Rápida de Fourier, el espectro de frecuencias obtenido es mucho más limpio.



- El rodamiento cuyo defecto se distingue mejor es el rodamiento con defecto en la pista externa. En el rodamiento con defecto en la pista interna todo apunta a que exista también algún tipo de fallo en bola.

5.2. Futuros desarrollos

Los algoritmos programados en este proyecto convergen relativamente bien, pero no lo suficientemente rápido como para poder automatizar un proceso de detección de defectos a tiempo real.

Con objeto de llevar a cabo dicha tarea, se propone programar los mismos algoritmos en código C, bien para utilizarlos directamente sobre un microprocesador o bien para utilizarlos en *scripts* en Matlab como archivos .mex.

Para realizar el estudio se han tomado cuarenta y ocho señales, de las cuales doce se han utilizado como muestra para realizar el análisis, el resto de señales se podrán utilizar si se precisa para corroborar los resultados.

La Transformada Wavelet Estacionaria no ha sido un buen método, sería conveniente elegir otro tipo de Transformada Wavelet y comprobar el mejor nivel de descomposición para este fin.

Se propone el desarrollo de una aplicación en Matlab con un entorno gráfico, para que, a partir de los programas desarrollados en este proyecto, una persona sin conocimientos sobre el tema pueda determinar si un rodamiento presenta defecto y dónde lo hace.



6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pavón MA. *La gestión del mantenimiento, un valor añadido*. Revista DYNA Ingeniería e Industria (vol. 82, nº 4, pág. 27-30). ISSN 0012-7361. Octubre 2007.
- [2] Redondo C, Zapico P, Esquibel LA. *Manual de Regulación de Máquinas Eléctricas*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de León. 550 págs. ISBN 84-9773-252-9. 2006.
- [3] Crespo A, Moreu P, Sánchez A. *Ingeniería de Mantenimiento. Técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos*. Ed. AENOR, Madrid. 412 págs. ISBN 84-8143-390-X. 2004.
- [4] Calvo Rolle, JL. *Sistema basado en conocimiento para análisis de vibraciones en mantenimiento predictivo*. DYNA Ingeniería e Industria (vol. 83, nº 8, pág. 484-492). Noviembre 2008.
- [5] Gavilán CJ. *El uso de la transformada de Hilbert para el diagnóstico de vibraciones*. DYNA Ingeniería e Industria (vol. 82, nº 7, pág. 382-386). ISSN 0012-7361. Octubre 2007.
- [6] Graps A. "An introduction to Wavelets". IEEE Computational Science (vol. 2, nº 2). 1995.
- [7] Cooley J, Tukey J. "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series". Mathematics of Computation (vol. 19, pág. 297-301). 1965.
- [8] Cizek, V. "Methods of Computation of Discrete Fourier Transform. In: Anonymous Discrete Fourier Transform and their applications". Bristol: Adam Hilger Ltd. (pág. 98-120). 1985.
- [9] Koo I, Kim W. "Development of reactor coolant pump vibration monitoring and a diagnostic system in the nuclear power plant". ISA Transactions (vol. 39, pág. 309-316). 2000.
- [10] Haar A. "Zur Theorie der Orthogonalen Funktionen-systeme". Mathematics Analysis (vol. 69, pág. 331-371). 1910.
- [11] Misiti M, Misiti Y, Oppenheim G, Poggi JM. "Wavelet Toolbox for use with Matlab®". The Math Works Inc. EEUU. 2004.
- [12] Morlet J. "Seismic tomorrow, Interferometry and Quantum Mechanics". Geophysicist Conference (SEG). Denver, USA. 1975.



- [13] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, Giard D. "*Wave propagation and sampling theory-Part I: Complex signal and scattering in multilayerd media*". Geophysics (vol. 47, pág. 203-221). 1982.
- [14] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, Giard D. "*Wave propagation and sampling theory-Part II: Complex signal and scattering in multilayerd media*". Geophysics (vol. 47, pág. 222-236). 1982.
- [15] Croiser A, Esteban D, Galand C. "*Perfect channel splitting by use of interpolation/decimation/tree decomposition techniques*" Int. Symp. Info., Circuits, Systems, Patras, Greece. 1976.
- [16] G. P. Nason and B. W. Silverman, "*The stationary wavelet transform and some statistical applications*". Notes in Statistics (vol. 108, pág. 281-289). 1995.
- [17] Norden E. Huang. "*Introduction to the Hilbert-Huang transform and its related mathematical problems*". Documento interno, Goddard Institute for Data Analysis, Code 614.2, NASA.
- [18] Cuadernos AEM de Mantenimiento (vol .2). Mantenimiento Predictivo en el Sector del Transporte. Octubre. ISBN: 84-87018-69-6. (2006)
- [19] Jaime Salvadó Ruiz, Marcos Rodríguez Millán, Álvaro Vaz-Romero Santero, "Máquina de simulación de fallos". Trabajo Dirigido del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, 2008.
- [20] Uytterhoeven.G, Roose.D, Bultheel.A. "*Integer wavelet Transform using the Lifting Scheme*". Documento interno, Katholieke Universiteit Leuven. 1999.

7. ANEXOS

Anexo I: Condiciones de seguridad de la Máquina Simuladora de Fallo (MSF) Spectra Quest

Condiciones de seguridad para el correcto funcionamiento de la máquina:

1. No someter a la máquina a vibraciones excesivas durante un largo periodo de tiempo.
2. Evitar superar el 20% de la velocidad crítica de diseño por un tiempo mayor de 30 segundos en cada uso.
3. No sobrepasar la velocidad de 6000 rpm (aplicable para simuladores de corriente alterna) por un tiempo mayor de 30 segundos.

Condiciones seguras de trabajo:

1. Trabajar con el simulador de fallo única y exclusivamente mientras la cubierta está cerrada (los elementos rotatorios pueden ser excesivamente peligrosos). No abrir el cerrojo bajo ninguna circunstancia, ya que está diseñado para evitar la apertura de la cubierta durante el funcionamiento.
2. Antes de abrir la cubierta esperar a que los elementos rotatorios estén completamente detenidos.
3. Utilizar siempre gafas de seguridad durante el trabajo con la máquina.
4. Mantener el cabello, la ropa, los dedos y otras partes del cuerpo alejados de los elementos en movimiento.
5. Trabajar en ambientes y lugares seguros.
6. No tensar en exceso los cables eléctricos de la máquina, manteniéndolos lejos de superficies calientes.
7. Mantener los cables extendidos libres de obstáculos durante todo el tiempo.
8. Reducir la posibilidad de desconexión de los cables eléctricos durante la operación, procurando que estén lo más extendidos posibles.
9. Asegurarse de que la superficie sobre la que se realice el ensayo sea estable.
10. Inspeccionar la máquina completamente antes de su uso por si ha sufrido algún tipo de daño o avería.
11. Apagar todos los dispositivos y esperar a que el motor se detenga antes de desconectar la máquina de la fuente de corriente.
12. No utilizar la máquina si los dispositivos no se han conectado o desconectado anteriormente de forma correcta.
13. Para evitar un posible *shock* eléctrico se debe de tener en cuenta:
 - a) No superar los 22 V en corriente alterna.



- b) Desconectar la máquina de la fuente de corriente para su limpieza y mantenimiento.
- c) Desconectar los cables eléctricos de la fuente mientras se realizan los ajustes de control del motor.
- d) No trabajar en ambientes húmedos.
- e) Inspeccionar el estado de los enchufes antes de cada uso.
- f) No operar con la máquina si la fuente o los cables eléctricos están dañados.
- g) Utilizar la extensión necesaria de cable para el uso del simulador de fallos.

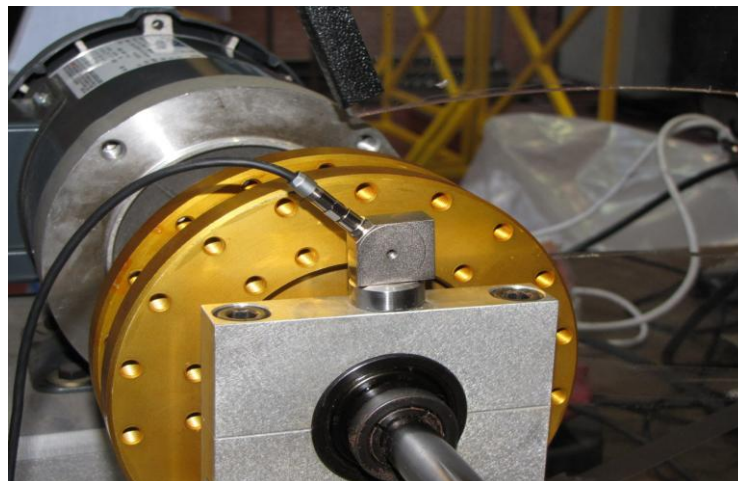
Anexo II: Instrucciones de montaje de la MSF Spectra Quest

1. Instalar los rodamientos adecuados tanto en la posición más cercana al motor como en la más lejana (en el anexo III se explicarán las instrucciones de montaje de los rodamientos MB Manufacturing ER10K). El rodamiento más cercano al motor será el rodamiento sometido a ensayo, por lo que se colocará en esa posición los rodamientos con los que se trabaje. En la parte más alejada del motor se colocará un rodamiento normal, sin ningún defecto, para todos los ensayos.



Posición de los rodamientos respecto al motor.

2. Montar el acelerómetro en la parte superior de la máquina donde se aloja el rodamiento elegido para su estudio cerciorándose de que el imán hace contacto correctamente y queda bien fijado.



Colocación del acelerómetro en el rodamiento de ensayo.

3. Conectar el acelerómetro al amplificador, que tendrá de ganancia 10; es decir, las medidas estarán 10 veces amplificadas. El amplificador deberá estar



alimentado con su correspondiente cable y como resultado la luz de encendido (del inglés, *power*) deberá estar iluminada durante todo el tiempo que dure la recogida de datos.

4. Conectar el amplificador a la tarjeta de adquisición de datos. Se tendrá que conectar a los puertos de señal analógica y de tierra analógica.
5. Conectar la tarjeta de adquisición de datos al ordenador a través de un puerto USB.
6. Introducir en el programa de adquisición de datos la frecuencia de muestreo y el número de muestras. En este ensayo la frecuencia de muestreo ha sido elegida en 5000 Hz, se introducirá en el recuadro *rate* y el número de puntos (del inglés, *points*) será 50000.
7. Encender la máquina, ponerla a una de las velocidades indicadas utilizando la rueda del cuadro de control más arriba y pulsar el botón verde con la leyenda poner en marcha (del inglés, *run*). Antes de encender la máquina se tendrá que bajar la tapa, ya que si no la máquina por seguridad no arrancará.
8. Es necesario esperar unos segundos para que la máquina llegue al régimen permanente. Es importante señalar que la velocidad real de la máquina es la del indicador del cuadro de mandos. La velocidad que se muestra en el tacómetro superior es errónea debido a la mala orientación del tacómetro, de la pegatina reflectante presente en la barra conducida o incluso a posibles reflejos con el material presente detrás de la máquina. La medida correcta será la que marque el control de velocidad de la máquina.
9. Tomar las medidas correspondientes y una vez tomadas modificar la velocidad. Cuando la máquina empiece a funcionar, hay que esperar al régimen permanente de la máquina para tomar las medidas. Durante el funcionamiento de la máquina ocurre un fenómeno, sobre todo con los rodamientos en mal estado, que es la transmisión de las vibraciones del conjunto a la rueda reguladora de velocidad. Como resultado puede ocurrir que se mueva y la máquina aumente o disminuya la velocidad, por lo que es necesario revisar cada cierto tiempo que se esté en la velocidad correcta.
10. Cuando se tengan todas las medidas con el rodamiento en buen estado, parar la máquina y montar un rodamiento en mal estado y repetir la operación.

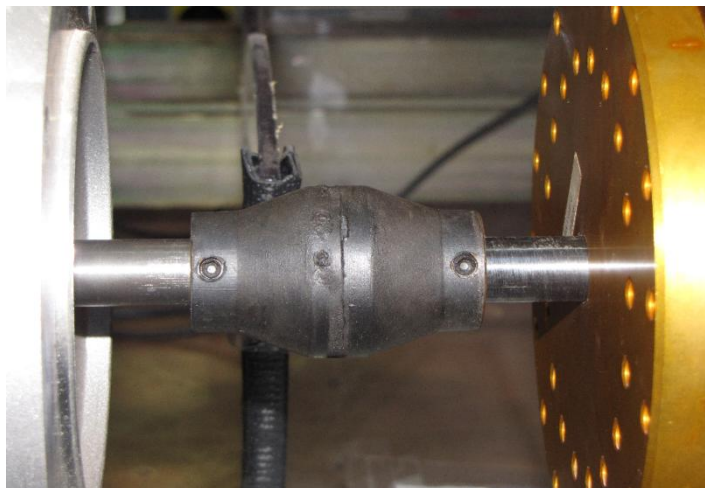
Anexo III: Instrucciones de montaje de los rodamientos MB Manufacturing ER10K

1. Asegurarse de que la máquina esté completamente parada. Para ello, se pondrá la rueda reguladora de velocidad a 0 y se pulsará el botón parar (del inglés, *stop*) del cuadro de mandos de la máquina.



Detención de la máquina.

2. Aflojar los dos tornillos superiores con la llave Allen 5/16 tanto de la zona del rodamiento a ensayar como la zona del rodamiento sin defecto, ya que se tendrá que extraer el eje conducido.
3. Retirar los soportes donde se encuentran alojados los rodamientos.
4. Aflojar el acoplamiento elástico existente entre el eje conductor, eje sólido del motor, y el conducido con la llave de 1/8. Sólo es necesario aflojar el tornillo correspondiente al apriete del eje conducido. Es importante no apretar en vacío este acoplamiento elástico ya que puede deformarse fácilmente dificultando posteriormente la colocación de la barra conducida.



Acoplamiento elástico entre el eje conductor y conducido.

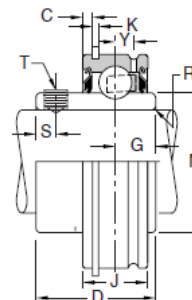
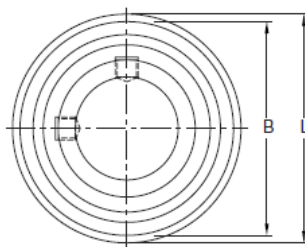
5. Extraer la barra y a continuación aflojar el rodamiento a cambiar con la llave de 3/32 y extraerlo. Cuando se haya desmontado hay que tener cuidado ya que al haber girado a una alta velocidad podría estar a elevada temperatura. En el caso de este proyecto, la máxima velocidad de giro es 30 Hz y la temperatura que presenta el rodamiento es elevada pero no llega a niveles de producir quemaduras.
6. Una vez fuera el rodamiento el proceso de montaje es el inverso del seguido para desmontar el rodamiento. Se ha de tener cuidado en el buen apriete de todos los tornillos que se han mostrado ya que un mal apriete puede dar a la aparición de vibraciones no provocadas por los defectos de los rodamientos.



Llaves Allen.



Anexo IV: Rodamiento MB Manufacturing ER10K



Shaft Dia. mm	Shaft Dia. Inches	Bearing Number	Basic Size	Bore Tolerance	B	C	D	G	J	K	L	N	R	S	T Tap Size	Y	Unit wt. (lbs/kg)
20	1/2	ER8	204	+0.0007-0.0000	1.8504	3/32	1 7/32	.405	.6240	3/64	2 1/16	.941	.040	15/64	#10-32	.142	0.62
	5/8	ER10															0.55
	3/4	ER12		+0.018-0.000	47.000	2.4	30.96	10.29	15.850	1.2	52.4	23.90	1.0	2.0	M6X1	3.61	0.54
25	7/8	ER14	205	+0.0007-0.0000	2.0472	3/32	1 3/8	.508	.7490	3/64	2 17/64	1.313	.040	15/64	1/4-28	.185	0.65
	15/16	ER15															0.63
	1	ER16 ER205		+0.018-0.000	52.000	2.4	34.92	12.90	19.025	1.2	57.6	33.35	1.0	2.0	M6X1	4.70	0.61
30	1 1/8	ER18	206	+0.0007-0.0000	2.4409	3/32	1 1/2	.625	.8740	3/64	2 21/32	1.587	.040	1/4	1/4-28	.224	0.96
	1 3/16	ER19															0.94
	1 1/4	ER20S ER206		+0.018-0.000	62.000	2.4	38.10	15.88	22.200	1.2	67.5	40.31	1.0	6.4	M8X1.25	5.69	0.90
35	1 1/4	ER20	207	+0.0008-0.0000	2.8346	1/8	1 11/16	.688	.9365	1/16	3 5/64	1.847	.040	21/64	5/16-24	.256	1.75
	1 3/8	ER22															1.70
	1 7/16	ER23		+0.020-0.000	72.000	3.2	42.88	17.48	23.787	1.6	78.2	46.91	1.0	8.3	M8X1.25	6.50	1.62
40	1 1/2	ER24 ER208	208	+0.0008-0.0000	3.1496	1/8	1 15/16	.750	1.0927	1/16	3 25/64	2.083	.062	3/8	5/16-24	.297	2.18
				+0.020-0.000	80.000	3.2	49.22	19.05	27.755	1.6	86.1	52.91	1.6	9.5	M8X1.25	7.54	1.0
																	2.28
45	1 5/8	ER26	209	+0.0008-0.0000	3.3465	1/8	1 15/16	.750	1.0927	1/16	3 19/32	2.281	.062	3/8	5/16-24	.297	2.22
	1 11/16	ER27															2.15
	1 3/4	ER28		+0.020-0.000	85.000	3.2	49.22	19.05	27.755	1.6	91.3	57.94	1.6	9.5	M8X1.25	7.54	1.0
50	1 7/8	ER30	210	+0.0008-0.0000	3.5433	1/8	2 1/32	.750	1.1240	3/32	3 25/32	2.475	.062	3/8	3/8-24	.265	2.75
	1 15/16	ER31															2.61
				+0.020-0.000	90.000	3.2	51.59	19.05	28.550	2.4	96.0	62.86	1.6	9.5	M10X1.5	6.73	1.2
55	2	ER32	211	+0.0009-0.0000	3.9370	1/8	2 3/16	.875	1.1860	3/32	4 11/64	2.749	.080	3/8	3/8-24	.298	3.38
	2 3/16	ER35															3.07
				+0.023-0.000	100.000	3.2	55.58	22.22	30.124	2.4	106.0	69.82	2.0	9.5	M10X1.5	7.57	1.4
60	2 1/4	ER36	212	+0.0009-0.0000	4.3307	1/8	2 9/16	1.000	1.2490	3/32	4 9/16	3.012	.080	3/8	3/8-24	.330	4.48
	2 3/8	ER38															4.38
	2 7/16	ER39		+0.023-0.000	110.000	3.2	65.07	25.4	31.725	2.4	115.9	76.50	2.0	9.5	M10X1.5	8.38	4.19
70	2 1/2	ER40	214	+0.0009-0.0000	4.9213	5/32	2 3/4	1.062	1.3740	7/64	5 9/32	3.433	.080	3/8	3/8-24	.374	5.92
	2 11/16	ER43															5.49
				+0.023-0.000	125.000	4.0	69.85	27.0	34.900	2.8	134.1	84.58	2.0	9.5	M10X1.5	9.50	2.5
75	2 7/8	ER46	215	+0.0009-0.0000	5.1181	5/32	3 1/16	1.313	1.4990	7/64	5 1/2	3.632	.080	3/8	3/8-24	.374	6.60
	2 15/16	ER47															6.37
				+0.023-0.000	130.000	4.0	77.77	33.32	38.075	2.8	139.7	92.25	2.0	9.5	M10X1.5	9.50	2.9
80	3	ER48	216	+0.0009-0.0000	5.5118	5/32	3 1/4	1.313	1.6865	7/64	5 7/8	3.920	.120	3/8	3/8-24	.406	8.05
	3 3/16	ER51															7.56
				+0.023-0.000	140.000	4.0	82.55	33.32	42.837	2.8	149.2	99.57	3.0	9.5	M10X1.5	10.31	3.4

[†]Bearing O.D. tolerance; 204 basic size, +.0000"-.0005" (+0.000mm -0.013mm); 205 thru 208 basic size, +.0000"-.0006", +0.000mm -0.015mm); 209 thru 212 basic size, +.0000"-.0008" (+0.000mm -0.020mm); 214 thru 216 basic size, +.0000"-.0010" (+0.000mm -0.025mm)

Características de los rodamientos.



Anexo V: Motor de Tres Fases de CA Marathon Electric de 1/2 & 1/3 CV

CERTIFICATION DATA SHEET

Model#: 56T34F5301 J
CONN. DIAGRAM: A-EE7308
OUTLINE: A-100141-656

WINDING#: ZT206 FR 3
ASSEMBLY: F1 ONLY

TYPICAL MOTOR PERFORMANCE DATA

HP	KW	SYNC. RPM	F.L. RPM	FRAME	ENCLOSURE	KVA CODE	DESIGN
1/2&1/3	.37&.246	3600	3450&2850	56C	TEFC	P	B

PH	Hz	VOLTS	FL AMPS	START TYPE	DUTY	INSL	S.F	AMB	ELEVATION
3	60/50	208- 230/460#190/ 380	2- 2.2/1.1&1.85/ 92	ACROSS THE LINE	CONTINUOU S	F3	1.15/1.15	40	3300

FULL LOAD EFF: 66&62	3/4 LOAD EFF: 64.5	1/2 LOAD EFF: 56.5	GTD. EFF	ELEC. TYPE	NO LOAD AMPS
FULL LOAD PF: 69.7&66	3/4 LOAD PF: 63.5	1/2 LOAD PF: 53	62	SQ CAGE IND RUN	1.4 / .7

F.L. TORQUE	LOCKED ROTOR AMPS	L.R. TORQUE	B.D. TORQUE	F.L. RISE
0.76 LB-FT	16 / 8	3 LB-FT 395	3.8 LB-FT 500	35

SOUND PRESSURE @ 3 FT.	SOUND POWER	ROTOR WK^2	MAX. WK^2	SAFE STALL TIME	STARTS /HOUR	APPROX. MOTOR WGT
68 dBA	78 dBA	0.02 LB-FT^2	1.5 LB-FT^2	10 SEC.	2	22 LBS.

*** SUPPLEMENTAL INFORMATION ***

DE BRACKET TYPE	ODE BRACKET TYPE	MOUNT TYPE	ORIENTATION	SEVERE DUTY	HAZARDOUS LOCATION	DRIP COVER	SCREENS	PAINT
C-FACE	STANDARD	BOLT-ON	HORIZONTAL OR UP OR DOWN	FALSE	NONE	PROVISIONS ONLY	NONE	STANDARD

BEARINGS		GREASE	SHAFT TYPE	SPECIAL DE	SPECIAL ODE	SHAFT MATERIAL	FRAME MATERIAL
DE	OPE						
BALL	BALL	STANDARD	STANDARD 56	NONE	NONE	STANDARD	ROLLED STEEL
-	-						

THERMO-PROTECTORS				THERMISTORS	CONTROL	SPACE /n HEATERS
THERMOSTATS	PROTECTORS	WDG RTDs	BRG RTDs			
NONE	NOT	NONE	NONE	NONE	FALSE	NONE VOLTS

*
N
O
T
E
S
*



INVERTER TORQUE: NONE
INV. HP SPEED RANGE: NONE

ENCODER: NONE
NONE NONE
NONE NONE PPR

BRAKE: NONE -
NONE P/N NONE
NONE NONE
- FT-LB NONE V NONE Hz

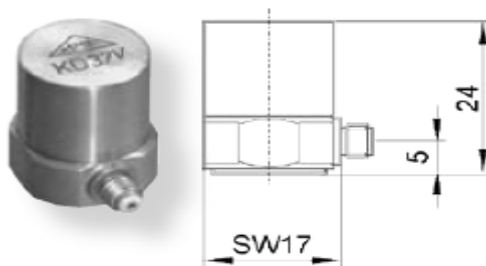
Características del motor eléctrico.

Anexo VI: Panel de control Delta Serie VFD

General Specifications			
Control Characteristics	Control System		SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation, carrier frequency 3k-10kHz)
	Output Frequency Resolution		0.1Hz
	Torque Characteristics		Including the auto-torque, auto-slip compensation; starting torque can be 150% at 5Hz
	Overload Endurance		150% of rated current for 1 minute
	Accel/Decel Time		0.1to 600 second (2 Independent settings for Accel/Decel Time)
	V/f Pattern		V/f pattern adjustable
	Stall Prevention Level		20 to 150%, Setting of Rated Current
Operating Characteristics	Frequency Setting	Keypad	Setting by   or Potentiometer
		External Signal	Potentiometer-5K Ω /0.5W, DC 0 to +10V or 0 to +5V (Input impedance 47K Ω), RS-485 interface, 4 to 20mA (Input impedance 250 Ω); Multi-Function Inputs 1 to 5 (7 steps, Jog, up/down)
	Operation Setting Signal	Keypad	Setting by RUN, STOP
		External Signal	M0 to M5 can be combined to offer various modes of operation, RS-485 serial interface (MODBUS).
	Multi-Function Input Signal		Multi-step selection 0 to7, Jog, accel/decel inhibit, first/second accel/decel switch, counter, 8-step PLC operation, external Base Block (NC, NO), increase/decrease Master Frequency
	Multi-Function Output Indication		AC Drive Operating, Frequency Attained, Non-zero, Base Block, Fault Indication, Local/Remote indication, PLC Operation indication.
	Analog Output Signal		Analog frequency/current signal output.
Other Function			AVR, S-Curve, Over-Voltage/Over-Current Stall Prevention, Fault Records, Adjustable Carrier Frequency, DC Brake, Start Frequency for DC Brake, Momentary Power Loss restart, Frequency Limits, Parameter Lock/Reset, PID Feedback Control, Reverse Inhibition, etc.
Built-in EMI Filter			VFD002S21E, VFD004S21E, VFD004S43E, VFD007S21E, VFD015S21E, VFD022S21E
Protection			Self-testing, Over Voltage, Over Current, Under Voltage, Overload, Overheating, External Fault, Electronic thermal, Ground Fault.
Cooling			Forced air-cooling (ONLY FOR 022S2XA/B; XXXS43A/B/E 1HP~3HP; XXXSXXD; XXXS21E 400W~3HP). Others are Natural air-cooling.
Environment	Installation Location		Altitude 1,000 m or below, keep from corrosive gasses, liquid and dust
	Pollution Degree		2
	Ambient Temperature		-10 C to 40 C (Non-Condensing and not frozen)
	Storage Temperature		-20 C to 60 C
	Ambient Humidity		Below 90% RH (non-condensing)
	Vibration		9.80665m/s ² (1G) less than 20Hz, 5.88m/s ² (0.6G) at 20 to 50Hz

Especificaciones generales del panel de control.

Anexo VII: Acelerómetro MMF KD37V



KD37V

Eigenschaften

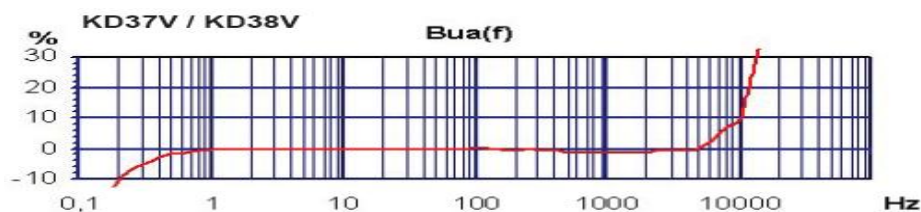
- Preiswerte Präzisionsaufnehmer mit Kompressionskeramik
- IEPE-Spannungsausgang erlaubt große Kabellängen in EMV-kritischer Umgebung
- Robustes Edelstahlgehäuse
- Befestigung mit M5-Gewinde im Boden

Properties

- Low-cost precision accelerometers with compression ceramics
- IEPE output allows long cables under harsh EMI conditions
- Sturdy stainless steel housing
- M5 mounting thread in base

		KD37V	KD38V	KD41V	KD42V	
Ausgang • Output		IEPE	IEPE	IEPE	IEPE	
Piezosystem • Piezo design		Kompressionsprinzip • Compression design				
Spannungsübertragungsfaktor • Voltage sensitivity	B_{ua}	80±20 %	80±20 %	140±20 %	140±20 %	mV/g
Messbereich • Range	a_+ / a_-	± 75	± 75	± 40	± 40	g
Eigenrauschen • Residual noise (20 ... 50 000 Hz)	a_n	80	80	40	40	µg
Konstantstromversorgung • Constant current supply	I_{CONST}	2 ... 20	2 ... 20	2 ... 20	2 ... 20	mA
Arbeitspunktspannung • Output bias voltage	U_{BIAS}	8 ... 12	8 ... 12	8 ... 12	8 ... 12	V
Linearer Frequenzbereich • Linear frequency range	f_{3dB}	3 ... 15000	3 ... 15000	3 ... 11000	3 ... 11000	Hz
	$f_{10\%}$	6 ... 10000	6 ... 10000	6 ... 6500	6 ... 6500	Hz
	$f_{5\%}$	9 ... 7000	9 ... 7000	9 ... 5000	9 ... 5000	Hz
Resonanzfrequenz • Resonant frequency	f_r	> 20	> 20	> 20	> 20	kHz
Querrichtungsfaktor • Transverse sensitivity	Γ_{90MAX}	< 10	< 10	< 10	< 10	%
Verhalten gegenüber Umgebungseinflüssen • Environmental characteristics						
Arbeitstemperaturbereich • Operating temperature range	T_{min} / T_{max}	-10 / 120	-10 / 120	-10 / 120	-10 / 120	°C
Temperaturkoeffizient • Temperature coefficient	$TK(B_{ua})$	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	%/K
Temperatursprungempfindlichkeit • Temperature transient sensitivity	b_{aT}	30	30	10	6	ms ² /K
Messobjektdehnungsempfindlichkeit • Base strain sensitivity	b_{aS}	0,2	0,5	0,1	0,1	ms ² /µD
Magnetfeldempfindlichkeit • Magnetic field sensitivity	b_{aB}	10	10	10	5	ms ² /T
Schalldruckempfindlichkeit • Acoustic noise sensitivity	b_{aP}	0,1	0,1	0,03	0,04	ms ² /kPa
Mechanische Daten • Mechanical data						
Masse ohne Kabel • Weight without cable	m	45 / 1,6	45 / 1,6	60 / 2,1	65 / 2,3	g / oz
Gehäusematerial • Case material		Edelstahl • Stainless steel				
Kabelanschluss • Cable connection		radial	axial	radial	axial	
Buchse • Socket		UNF10-32	UNF10-32	UNF10-32	UNF10-32	
Befestigung • Mounting		M5-Bodengewinde • M5 thread in base				

Typischer Frequenzgang Typical Amplitude Response



Propiedades, características y datos técnicos del acelerómetro.

Anexo VIII: Amplificador MMF M32



Anwendung

- Signalaufbereitung bei dynamischen Messungen mit piezoelektrischen IEPE-Sensoren für Beschleunigung, Kraft und Druck oder IEPE-Mikrofonen
- Signalverstärkung und Antialiasing-Filterung für Messungen mit PC-Datenerfassungssystemen beim M32
- Aufbau von Vielkanal-Messsystemen
- Einsetzbar in Industrie, Labor und Feld

Eigenschaften

- Modulares Gerätesystem: Durch zwei seitlich in das Gehäuse einschraubbare 4 mm-Kontaktstifte wird gleichzeitig die mechanische Verbindung und die Stromversorgung zum Nachbarmodul hergestellt
- Befestigungsadapter für 35 mm-DIN-Schienen als Zubehör erhältlich
- Robuste und sehr kompakte Aluminiumgehäuse
- BNC-Buchsen als Ein- und Ausgang
- Eingänge für Aufnehmer mit Konstantstromspeisung (IEPE)
- Sensorkontroll-LED meldet 3 Zustände: OK, Kabelbruch und Kurzschluss
- M32 mit drei Verstärkungsbereichen (1 / 10 / 100), wählbar mittels Drehschalter
- Hohe Bandbreite
- M32 mit auswechselbarem Tiefpassfilter als Steckmodul
- Gleichspannungsversorgung über DIN 45323-Steckverbindung oder zwei 4 mm-Bananenbuchsen an der Gehäusesseite
- Weiter Versorgungsspannungsbereich
- Isolation zwischen Signalmasse und Versorgungsspannung vermeidet Erdungsprobleme
- Flexibel und preisgünstig

Technische Daten

Technical Data

	M28	M32
Eingang Input	IEPE, BNC-Buchse IEPE, BNC socket	
IEPE-Sensorspeisung IEPE sensor supply	3,8 .. 5,6 mA Konstantstrom, Quellenspannung: > 24 VDC 3.8 to 5.6 mA constant current, compliance voltage: > 24 VDC	
Sensorkontrolle Sensor status indicator	dreistufig mit LED (Eingang offen = aus, OK = gelb, Kurzschluss = rot) three level sensor status by LED (input open = off, OK = yellow, short-circuit = red)	
Verstärkung Gain	1 ± 0,5 %	1 / 10 / 100 ± 1 % typ.; ± 2 % max.
Ausgangspegel Output level	> ± 10 V _{pp} (abhängig vom Sensor) > ± 10 V _{pp} (depending on Sensor)	> ± 10 V _{pp} > ± 10 V _{pp}
Ausgangsbeschaltung Output coupling	AC-gekoppelt über 10 µF; 220 kΩ parallel AC coupled over 10 µF; 220 kΩ parallel	DC-gekoppelt; Impedanz < 100 Ω DC coupled; impedance < 100 Ω
Rauschen am Ausgang (Breitband 1 Hz .. 50 kHz) Noise at output (wide band 1 Hz .. 50 kHz)	< 100 µV _{rms} < 100 µV _{rms}	< 1 mV _{rms} < 1 mV _{rms}
Frequenzbereich (-3 dB) Frequency range (-3 dB)	0.1 Hz .. 100 kHz	0.1 Hz .. 30 kHz
Tiefpassfilter* Low pass filter*	-	Steckmodul Typ FB2...* Plug-in module model FB2...*
Filtertyp Filter type	-	vierpolig, Butterworth, Dämpfung > 70 dB/Dek. 4 poles, Butterworth, attenuation > 70 dB/dec.
Stromversorgung Power supply	5 .. 26 VDC / 100 mA	5 .. 26 VDC / 200 mA
Stromversorgungsanschluss Power supply connector	DIN 45323-Rundsteckverbinder oder 2 Bananenstecker DIN 45323 circular connector or 2 Banana plugs	
Betriebstemperaturbereich Operating temperature range	-10 .. 55 °C, 95 % relative Feuchte, ohne Kondensation 14 .. 131 °F, 95 % relative humidity, no condensation	
Abmessungen (Breite x Höhe x Tiefe) Dimensions (width x height x depth)	33 x 59 x 44 mm ³ 1.3 x 2.3 x 1.7 in ³	56 x 59 x 44 mm ³ 2.2 x 2.3 x 1.7 in ³
Masse Weight	120 g 4.3 oz	170 g 6 oz
Zubehör Accessories	2 Bananenstecker zum Einschrauben 2 threaded Banana plugs	
Optionales Zubehör Optional Accessories	Filtermodul DIN-Schienenadapter Steckernetzteil 100 .. 240 VAC; 50/60 Hz; 12 VDC; 500 mA Steckernetzteil 100 .. 240 VAC; 50/60 Hz; 12 VDC; 1 A Filter module DIN rail adapter Mains plug adapter 100 .. 240 VAC; 50/60 Hz; 12 VDC; 500 mA Mains plug adapter 100 .. 240 VAC; 50/60 Hz; 12 VDC; 1 A	FB2... M28/32DIN PS500 PS1600 FB2... M28/32DIN PS500 PS1600

* Bitte Filtermodultyp bei Bestellung angeben. Standardbestückung, wenn nicht anders vermerkt, ist FB2-30 kHz.

* Please specify in your order the desired filter module frequency. If not otherwise stated the M32 is supplied with FB2-30 kHz.

Aplicación, propiedades y datos técnicos del amplificador.

Anexo IX: Tarjeta de adquisición de datos Keithley KUSB-3100

Analog Inputs	Analog Outputs	Resolution	I/O Range	Sample Rate	Digital I/O	Counter/Timer ^a
8 SE	2	12-bit	±10 V	50 kS/s	8 in, 8 out	1

- a. This counter/timer channel allows you to perform event counting, frequency measurement, edge-to-edge measurement, and continuous pulse output (rate generation) operations.

A/D Subsystem Specifications

Feature	KUSB-3100 Specifications
Number of analog input channels	8 single-ended
Number of gains	4 (1, 2, 4, 8)
Resolution	12-bit
Data encoding	twos complement
System accuracy, to % of FSR Gain = 1: Gain = 2: Gain = 4: Gain = 8:	0.04% 0.06% 0.08% 0.15%
Input Range Gain = 1: Gain = 2: Gain = 4: Gain = 8:	±10 V, ±5 V, ±2.5 V, ±1.25 V
Nonlinearity	0.05%
Differential nonlinearity	±1/2 LSB
Inherent quantizing error	1 LSB
Drift Zero: Gain: Differential linearity:	±100 µV ±100 ppm monotonic
Input impedance ^a Off channel: On channel:	10 MΩ, 10 pF 10 MΩ, 100 pF

D/A Subsystem Specifications

Feature	KUSB-3100 Specifications
Number of waveform analog output channels	2
Resolution	12-bit
Data encoding	Twos Complement
Nonlinearity	0.05%
Differential nonlinearity	±1 LSB
Inherent quantizing error	1 LSB
Output range	±10 V
Error Zero: Gain:	±4 mV ±0.2%
Drift Zero (bipolar): Gain:	±100 µV / °C ±100 ppm
Throughput Continuously paced analog output mode:	50 kHz
Current output	±2 mA
Output impedance	<0.2 Ω
Capacitive driver capability	1000 pF minimum
Protection	Short to ground
Power-on voltage	0 V ±10 mV

A/D Subsystem Specifications (cont.)

Feature	KUSB-3100 Specifications
Input bias current	±10 nA
Maximum input voltage (without damage) Power on: Power off:	±35 V ±20 V
A/D conversion time	8 µs
Channel acquisition time (±1% LSB)	20 µs
Sample-and-hold Aperture uncertainty: Aperture delay:	2 ns 200 ns
Throughput	50 kHz
ESD protection (per spec) Arc: Contact:	8 kV 4 kV
Reference	2.5 V
Monotonicity	Yes
Sample Clock Internal: External:	Yes Yes
Trigger Source Internal: External:	Yes Yes
A/D Converter Noise	0.6 LSB rms
Channel-to-Channel Offset	0.1 mV

D/A Subsystem Specifications (cont.)

Feature	KUSB-3100 Specifications
Settling time to 0.01% of FSR	20 µs
Slew rate	2 V/µs
Glitch energy	1 µV-sec
ESD protection (per spec) Arc: Contact:	8 kV 4 kV
Monotonicity	Yes
Output Clock Internal: External:	Yes No
Trigger Source Internal: External:	Yes No

**A/D Subsystem Specifications (cont.)**

Feature	KUSB-3100 Specifications
Effective Number of Bits at 50 kHz with a 1 kHz sine wave:	10.5 bits
Total Harmonic Distortion	< -70 db @ 1 kHz
Channel Crosstalk	-74 db @ 1 kHz
Maximum A/D Pacer Clock	
Single Analog Input Throughput:	50 kHz
Multiple Analog Input Throughput:	50 kHz

a. Very high input impedance minimizes any source error.

Características y especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos.